



Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante

CONTROL VISUAL-FUERZA  
AUTOCALIBRADO PARA SEGUIMIENTO DE  
TRAYECTORIAS EN TAREAS  
COOPERATIVAS ROBÓTICAS

Gabriel Jesús García Gómez

Tesis

Doctorales

[www.eltallerdigital.com](http://www.eltallerdigital.com)

UNIVERSIDAD de ALICANTE



**Universitat d'Alacant**  
**Universidad de Alicante**

Escuela Politécnica Superior  
Departamento de Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal

# **CONTROL VISUAL-FUERZA AUTOCALIBRADO PARA SEGUIMIENTO DE TRAYECTORIAS EN TAREAS COOPERATIVAS ROBÓTICAS**

**Tesis Doctoral**

Doctorado Interuniversitario en Automática y Robótica

*Autor:*

**Gabriel Jesús García Gómez**

*Directores:*

**Jorge Pomares Baeza**  
**Fernando Torres Medina**

Alicante, 2010





Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante  
Escuela Politécnica Superior  
Departamento de Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal

# **CONTROL VISUAL-FUERZA AUTOCALIBRADO PARA SEGUIMIENTO DE TRAYECTORIAS EN TAREAS COOPERATIVAS ROBÓTICAS**

## **Tesis Doctoral**

Doctorado Interuniversitario en Automática y Robótica

Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante

*Autor:*  
Gabriel Jesús García Gómez

*Directores:*  
Jorge Pomares Baeza  
Fernando Torres Medina

Alicante, 2010





---

# Resumen

En esta Tesis Doctoral se presentan diversas técnicas de control de robots manipuladores. El objetivo perseguido es plantear nuevos esquemas de seguimiento de trayectorias empleando información visual y de fuerza, que permitan al robot repetir trayectorias seguras, en entornos muy complejos para tareas de ensamblado y/o desensamblado.

En los sistemas de guiado de robots por visión existentes en la literatura, no se permite realizar posicionamientos del extremo del robot siguiendo una trayectoria deseada. Además, con los sistemas clásicos de control visual basado en imagen sólo se puede asegurar la estabilidad asintótica de manera local. A lo largo de esta Tesis se propone un método de seguimiento de trayectorias en imagen que no sólo mejora el comportamiento de los sistemas de control visual clásicos, permitiendo repetir una trayectoria predefinida, sino que también presenta una característica novedosa: permite definir la velocidad de seguimiento. Este método de seguimiento presenta un comportamiento intemporal, aspecto éste indispensable para que el robot pueda atender cualquier evento no previsto debido a su interacción con el entorno.

Los sistemas de control visual requieren una calibración previa de la cámara. Los estudios realizados sobre los errores cometidos en la estimación de estos parámetros permiten concluir que el entorno de estabilidad asintótica local se reduce cuando el error de estimación aumenta. Para resolver este problema, se presenta en esta Tesis un método de calibración on-line de la cámara basado en control visual virtual. Su aplicación al método de seguimiento permite obtener un sistema de control visual autocalibrado para tareas de repetición de trayectorias definidas en el espacio imagen.

En el control de robots manipuladores comerciales no se suele realizar un control directo sobre sus articulaciones, debido principalmente al desconocimiento de los parámetros dinámicos. El diseño y construcción de un robot permitirá conocer estos parámetros de forma precisa y aplicar algoritmos más complejos de control visual, que proporcionarán un guiado mucho más rápido y preciso al eliminar el retardo que se produce en los sistemas indirectos de control. Partiendo del prototipo de un robot, se describen tres métodos novedosos que permiten repetir trayectorias definidas en la imagen con comportamiento intemporal y con distinto grado de control sobre la velocidad de la tarea.

En ocasiones, el robot que está siguiendo una trayectoria en el espacio 3-D entra en contacto con algún objeto de su espacio de trabajo. Para permitir que el sistema de visión pueda seguir enviando referencias válidas, es indispensable tener información de las fuerzas y pares en el extremo del robot. Conociendo estas fuerzas y pares, se proponen dos métodos que permiten modificar la trayectoria en imagen que el robot estaba siguiendo, para hacerla compatible con las fuerzas ejercidas por el extremo del robot. Además, se propone un método capaz de fusionar la información visual y la de fuerza para detectar un cambio en la normal de la superficie de contacto. Con estas dos

estrategias se tiene un esquema general que permita obtener una acción de control conjunta y coherente a partir de la información de los dos sensores.

La validez de los esquemas de control propuestos queda confirmada con la realización de diversos experimentos prácticos. En estos experimentos se observa la necesidad de un sistema de posicionamiento preciso siguiendo trayectorias seguras. Además, tanto la interacción del robot en tareas de ensamblado, como la presencia de un operador humano muestran la necesidad de un sistema de seguimiento intemporal.



Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante

---

# Abstract

In this PhD Thesis different control schemes for robotic manipulators are proposed. The aim is to set out new path tracking approaches based on visual and force information which enable the robot to repeat safe paths in very complex environments for assembly and disassembly tasks.

In existing visual guidance systems for robots described in the literature, the positioning of the robot's end-effector according to a desired path is not possible. Furthermore, classical image based visual servoing systems only guarantee local asymptotic stability. This Thesis proposes an image path tracking method which does not only improves the behavior of classical visual servoing system by following a predefined trajectory, but it also has a novel feature: the definition of the tracking velocity. This tracking method presents a time-independent behavior so that the robot can deal with any unexpected event during the interaction with the environment.

Visual servoing systems require a previous calibration of the camera. The research about the errors made by the estimation of these parameters shows that the range of local asymptotic stability is reduced when the estimation error increases. In order to solve this problem, an on-line calibration method of the camera based on virtual visual servoing is presented in this Thesis. The application of this calibration technique to the tracking method results in an adaptive visual servoing system for tasks based on the repetition of paths defined in the image space.

Commercial robotic manipulators are not usually controlled by a direct control over their joints because their dynamic parameters are unknown. The design and construction of a robot permits to know precisely these parameters and apply more complex visual servoing algorithms which provide a much quicker and precise guidance process due to the removal of delays produced by indirect control systems. From the prototype of the robot, three new methods are described in order to repeat image trajectories with a time independent behavior and with different types of control over the task velocity.

When the robot is tracking a path in the 3-D space, it sometimes contact with an object in its workspace. It is indispensable to gather force and torque information on the robot's end-effector in order to make the vision system send valid references. When these forces and torques are known, two methods are proposed to modify the image path that the robot is tracking in order to make it compatible with the forces exerted by the robot's end-effector. It is also proposed a method which fuses visual and force information to detect a change in the normal of the contact surface. These two strategies enable a general scheme which determines a common and coherent control action from the two sensors' information.

The validity of the proposed control schemes has been confirmed through the execution of several practical experiments. These experiments show the necessity of a precise positioning system based on the tracking of safe trajectories. In addition, not

only the interaction of the robot in assembly tasks, but also the presence of a human operator show the necessity of a time independent tracking system.



Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante



**1 Introducción**

1.1	Motivación .....	1
1.2	Marco de la Tesis.....	4
1.3	Aportaciones.....	5
1.4	Estructura de la Tesis .....	7

**2 Control Visual**

2.1	Revisión histórica.....	9
2.1.1	Introducción .....	9
2.1.2	Arquitectura del sistema de visión .....	12
2.1.2.1	Cámara externa al robot .....	12
2.1.2.2	Cámara en el extremo del robot .....	14
2.1.3	Clasificación de los sistemas de control visual.....	14
2.1.3.1	Ver y mover estático.....	14
2.1.3.2	Ver y mover dinámico .....	15
2.1.3.3	Control visual directo .....	16
2.1.3.4	Control basado en posición y basado en imagen.....	16
2.2	Control visual basado en imagen .....	23
2.2.1	Estado del arte en control visual indirecto basado en imagen.....	24
2.2.1.1	Características extraídas en control visual.....	28
2.2.2	Matriz de interacción .....	30
2.2.3	Controlador utilizando la matriz de interacción.....	36
2.2.4	Estabilidad en el sentido de Lyapunov .....	38
2.2.4.1	Análisis de la estabilidad asintótica global por Lyapunov.....	40
2.2.4.2	Análisis de la estabilidad asintótica local por Lyapunov.....	41
2.2.5	Un primer ejemplo de tarea de control visual basado en imagen....	42
2.3	Control Visual Virtual.....	45
2.3.1	Introducción .....	45
2.3.2	Formulación .....	48
2.4	Conclusiones.....	51

**3 Seguimiento intemporal de trayectorias. Control indirecto**

3.1	Introducción .....	53
3.2	Generación de la trayectoria en el espacio imagen .....	59
3.3	Control visual basado en flujo de movimiento .....	60
3.4	Seguimiento intemporal basado en la norma de la Homografía 2-D.....	64
3.5	Seguimiento intemporal basado en control visual virtual.....	72
3.5.1	Estabilidad del método.....	78
3.6	Implementación .....	79
3.6.1	Sistema de simulación .....	79
3.6.2	Arquitectura del sistema .....	79
3.7	Resultados.....	80
3.7.1	Resultados de simulación.....	80

3.7.1.1	Trayectoria con las características iniciales en la trayectoria deseada.....	80
3.7.1.2	Trayectoria con las características iniciales fuera de la trayectoria deseada .....	84
3.7.1.3	Trayectoria en espacio imagen muy oscilante.....	88
3.7.2	Resultados experimentales.....	90
3.7.2.1	Comparativa frente a sistemas de seguimiento con control visual dependientes del tiempo.....	90
3.7.2.2	Comparativa con el control visual basado en flujo de movimiento.....	94
3.7.3	Estudio del comportamiento frente a variación de los parámetros del sistema.....	97
3.7.3.1	Estudio de la respuesta del sistema ante variaciones en la velocidad.....	97
3.7.3.2	Estudio de la respuesta del sistema ante variaciones en el muestreo de la trayectoria deseada .....	101
3.8	Conclusiones.....	104

#### **4 Seguimiento de trayectorias con control visual adaptativo**

4.1	Introducción .....	107
4.2	Combinando control visual y control visual virtual.....	109
4.3	Calibración multi-imagen.....	109
4.4	Seguimiento intemporal de trayectorias en la imagen basado en control visual adaptativo .....	112
4.5	Resultados.....	113
4.5.1	Control visual virtual mono-imagen .....	113
4.5.2	Control visual virtual multi-imagen.....	116
4.5.2.1	Prueba 1 .....	118
4.5.2.2	Prueba 2 .....	119
4.5.2.3	Prueba 3 .....	120
4.6	Conclusiones.....	121

#### **5 Control visual directo para el seguimiento de trayectorias**

5.1	Introducción .....	123
5.2	Control visual directo con un robot de 2 grados de libertad.....	127
5.3	Seguimiento intemporal de trayectorias en la imagen basado en control visual directo .....	129
5.4	Resultados de simulación.....	131
5.4.1	Descripción del robot simulado .....	131
5.4.2	Esquema de control en Matlab/Simulink.....	133
5.4.3	Simulación de control visual directo basado en imagen .....	134
5.4.4	Simulaciones de seguimiento de trayectorias .....	135
5.4.4.1	Método de umbral de error.....	136
5.4.4.1.1	Prueba 1.....	136
5.4.4.1.2	Prueba 2.....	137
5.4.4.1.3	Prueba 3.....	139

5.4.4.2	Método de velocidad mínima.....	141
5.4.4.2.1	Prueba 1.....	141
5.4.4.2.2	Prueba 2.....	144
5.4.4.3	Método de velocidad constante.....	146
5.4.4.3.1	Prueba 1.....	146
5.4.4.3.2	Prueba 2.....	148
5.4.4.3.3	Prueba 3.....	150
5.5	Conclusiones.....	152

## 6 Control visual-fuerza

6.1	Introducción .....	155
6.1.1	Control visual-fuerza híbrido .....	158
6.1.2	Control de impedancia .....	163
6.1.3	Otras aproximaciones .....	165
6.2	Fusión de control visual-fuerza basado en control de impedancia .....	167
6.2.1	Esquema de control de impedancia con realimentación visual.....	168
6.2.2	Modificación de la trayectoria en la imagen a partir de las fuerzas de interacción.....	170
6.2.2.1	Método basado en la matriz de homografía 2-D.....	170
6.2.2.2	Matriz de interacción Fuerza-Imagen.....	175
6.2.3	Detección de un cambio en la superficie.....	179
6.2.3.1	Detección de discontinuidad de superficies a partir de las fuerzas de interacción.....	179
6.2.3.2	Luz estructurada para la detección de zonas de discontinuidades en el espacio imagen .....	181
6.2.3.3	Luz estructurada y fuerzas de interacción para la detección conjunta de cambios en las superficies.....	181
6.3	Resultados.....	183
6.3.1	Tareas de control visual manteniendo el contacto sobre una superficie .....	183
6.3.1.1	Detección de cambios en la superficie .....	183
6.3.1.1.1	Arquitectura del sistema.....	183
6.3.1.1.2	Detección utilizando sólo la información de fuerzas .....	184
6.3.1.1.3	Mejora de la detección de cambios en la superficie usando el sistema multisensorial.....	185
6.3.1.1.3.1	Experimento 1. Superficie convexa.....	185
6.3.1.1.3.2	Experimento 2. Superficie cóncava.....	186
6.3.1.2	Modificación de la trayectoria con la matriz de interacción fuerza-imagen .....	187
6.3.1.2.1	Resultados de simulación .....	187
6.3.1.2.2	Resultados experimentales .....	189
6.3.1.2.2.1	Experimento 1.....	189
6.3.1.2.2.2	Experimento 2.....	190

6.3.2	Tarea de inserción mediante control visual-fuerza .....	191
6.4	Conclusiones.....	193
<b>7</b>	<b>Resultados</b>	
7.1	Introducción .....	195
7.2	Herramienta para la ejecución de tareas de control visual: ViSeC .....	197
7.3	Ensamblado de una estructura metálica.....	199
7.3.1	Arquitectura del sistema .....	199
7.3.2	Descripción del proceso de montaje de la estructura.....	201
7.3.2.1	Tarea 1. Inserción de un tubo usando el controlador visual-fuerza .....	203
7.3.2.2	Tarea 4. Interacción humano-robot.....	206
7.4	Cambio de una bombilla en una farola.....	210
7.4.1	Arquitectura del sistema .....	210
7.4.2	Descripción del proceso de cambio de la bombilla .....	211
7.4.3	Sistema de posicionamiento del brazo robótico.....	213
7.4.3.1	Sistema intemporal de seguimiento de trayectorias.....	213
7.4.3.2	Sistema de posicionamiento preciso con control visual virtual.....	216
7.4.4	Calibración on-line de la cámara.....	217
7.4.5	Detección del humano durante el seguimiento de trayectorias .....	218
7.4.6	Medición de las fuerzas en el extremo para detectar el desenroscado de los distintos elementos .....	219
7.4.6.1	Desenroscado del difusor esférico .....	219
7.4.6.2	Desenroscado de la bombilla .....	220
7.5	Desensamblado de una mini-nevera.....	220
7.5.1	Descripción de la tarea.....	220
7.5.2	Necesidad de un sistema de seguimiento intemporal .....	221
7.6	Conclusiones.....	224
<b>8</b>	<b>Conclusiones</b>	
8.1	Conclusiones.....	225
8.2	Publicaciones .....	227
8.2.1	Revistas impactadas .....	227
8.2.2	Capítulos de libro y revistas no impactadas.....	229
8.2.3	Congresos internacionales .....	230
8.2.4	Congresos nacionales.....	232
8.3	Trabajos futuros .....	233
	<b>Anexo 1. Cuaternios</b>	
A1.1.	Definición.....	235
A1.2.	Transformaciones básicas .....	235
A1.3.	Interpolación de la Orientación.....	236

---

**Anexo 2. Método de Optimización de Levenberg - Marquardt**

A2.1. Definición.....	239
A2.2. Transformaciones básicas .....	239
<b>Referencias.....</b>	<b>243</b>



Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante





Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante

- **Tesis.pdf**

Documento de la Tesis en formato PDF.

- **VidCap2**

- video2-1.wmv

Tarea de control visual basado en imagen clásico. Un patrón de 4 puntos sirve como características visuales. El robot sigue al objeto utilizando control visual basado en imagen.

- video2-2.wmv

Evolución de las características en la imagen en una tarea de control visual. Se observa el sistema de control posiciona la cámara de forma que las características iniciales evolucionen hacia las deseadas.

- **VidCap3**

- video3-1.mpg

Trayectoria deseada del robot en el espacio Cartesiano 3-D.

- video3-2.mpg

A partir de la trayectoria deseada mostrada en video3-1.mpg, se realiza un seguimiento de la trayectoria empleando un sistema con comportamiento temporal. Un control de fuerza permite separar al robot de su posición de manera manual. Cuando se suelta, el robot ha perdido las referencias y no puede seguir la trayectoria desde la posición en la que la dejó.

- video3-3.avi

En este vídeo se observa el correcto comportamiento de los métodos intemporales de seguimiento de trayectorias. Se realiza la misma operación que la mostrada en el vídeo anterior. Sin embargo, con estos sistemas intemporales las referencias no se pierden por el tiempo y la trayectoria se continúa desde la posición en la que se pausó.

- video3-4.avi

En este vídeo se muestra otra prueba de seguimiento intemporal.

- video3-5.mpg / video3-5.m2v

Este vídeo muestra la necesidad de que el sistema de seguimiento de trayectorias no dependa del tiempo. Unas esponjas situadas bajo la trayectoria que el robot debe seguir permiten simular la colisión del robot con un objeto peligroso. La presencia del humano separa al robot con el objetivo de mantener una distancia de seguridad. En estas condiciones, un método temporal puede llegar a hacer colisionar al robot con las esponjas, mientras que un método intemporal completa satisfactoriamente la trayectoria ante la misma situación.

- **VidCap4**

- video4-1.wmv

En este vídeo se observa la correcta estimación de los parámetros extrínsecos a partir del control visual virtual. Para comprobar el correcto funcionamiento del sistema de calibración se introduce una taza virtual sobre un objeto real. La cámara virtual tiene los mismos parámetros que la cámara real, ya que objeto y taza se mantienen solidarios aunque se mueva el objeto real.

- **VidCap6**

- video6-1.mpg

En este vídeo se muestra una tarea de interacción donde la trayectoria seguida con control visual se modifica a partir de la matriz de interacción fuerza-imagen. La superficie es una superficie flexible.

- **VidCap7**

- video7-1.wmv

Este vídeo muestra una tarea de control visual basado en imagen implementada en ViSeC en la que un robot debe equiparse con la herramienta situada en otro robot en movimiento.

- video7-2.wmv

También implementada en ViSeC, en esta tarea se utiliza un estimador de movimiento para mediante control visual recoger un objeto situado sobre una cinta transportadora.

- video7-3.avi / video7-3.mpg / video7-3.m2v

En este vídeo se explican las distintas fases para el ensamblado de una estructura metálica donde cooperan dos robots manipuladores y un operador humano.

- video7-4.avi

Las trayectorias seguidas por los robots en el ensamblado de la estructura metálica mostrada en el vídeo anterior se realizan con el sistema de seguimiento intemporal propuesto. En este vídeo se puede ver la evolución de las características en la imagen durante el seguimiento de una de las trayectorias.

- video7-5.avi / video7-5.mpg

En este vídeo se muestra la estrategia propuesta para la inserción de barras en los conectores de la estructura.

- video7-6.mpg / video7-6.m2v

El último vídeo explica la secuencia para el cambio de una bombilla en una farola de manera automática.

# Introducción

En este Capítulo se comentan las principales motivaciones que han propiciado la realización de esta Tesis Doctoral, enmarcando las investigaciones realizadas dentro de tres grandes proyectos y la concesión de una beca FPI de la Generalitat Valenciana. También se presentan en este Capítulo las aportaciones realizadas en el ámbito de los sistemas de control visual y control

1.1 <b>Motivación</b> .....	1
1.2 <b>Marco de la Tesis</b> .....	4
1.3 <b>Aportaciones</b> .....	5
1.4 <b>Estructura de la Tesis</b> .....	7

visual-fuerza que se detallarán a lo largo de la Tesis. Por último, se describirá cómo se ha estructurado el documento, indicando qué temas se abordan en cada Capítulo.

## 1.1 Motivación

Los sistemas robotizados para la manipulación automática se han ido implantando con mayor frecuencia en los últimos años en la industria en general. Estos sistemas van desde el más simple de empaquetado o agarre de objetos en cintas transportadoras hasta los más complejos en la industria del automóvil. En muchas ocasiones, no se conoce con exactitud las características del objeto a manipular o estos presentan una gran variedad, por lo que en estos casos es necesaria la aplicación de sistemas de control sensorial para el guiado y manipulación en un entorno robotizado. En general, se puede afirmar que los sistemas de control sensorial aumentan la flexibilidad y autonomía de los sistemas robóticos. En aplicaciones de la robótica como las de ensamblado, desensamblado o reciclado, a menudo se requieren altas prestaciones y la aplicación de sistemas de guiado sensorial debe incorporarse para hacer a estos sistemas más robustos.

Para el guiado de robots uno de los sistemas sensoriales con más auge en la actualidad son los basados en visión por computador. La visión artificial constituye uno de los temas de investigación que posee en la actualidad un espectro más amplio de posibles aplicaciones industriales, y que en un futuro adquirirá todavía una mayor relevancia. Muestra de ello son tanto los esfuerzos que dedican al tema los principales centros de investigación de España [GarciaGJ-2009] y del mundo entero, como el interés que demanda la industria en estas aplicaciones. Sus características especiales les hace capaces de capturar una gran cantidad de información de su entorno y facilitar el guiado del robot sin la necesidad de disponer de un conocimiento exhaustivo previo del espacio de trabajo. Así surgieron los sistemas de control visual [Hutchinson-1996] para el guiado de robots empleando información visual. Sin embargo, la aplicación práctica de estos sistemas de control en entornos no estructurados implican una serie de problemas que aún en la actualidad siguen sin estar resueltos.

Uno de estos problemas es la necesidad de disponer de un sistema calibrado de la cámara empleada, de forma que si se modifica alguna propiedad de la cámara, es necesaria una nueva calibración para determinar de nuevo sus parámetros intrínsecos. A pesar de que en la actualidad es posible encontrar sistemas de control visual para el guiado de robots de manera independiente a los cambios en los parámetros intrínsecos [Malis-2004a], en tareas de manipulación en ocasiones es necesario conocerlos debido a posibles cambios en los mismos durante la tarea. Estos aspectos requieren disponer en cierta medida de un entorno estructurado en el que tanto las propias características del objeto a manipular como los parámetros intrínsecos de la cámara utilizada deben ser conocidos a priori.

Otro problema detectado en los sistemas de control visual es la incapacidad de éstos para guiar al robot siguiendo una trayectoria específica. Las tareas de ensamblado y desensamblado en una celda robótica suelen ser tareas complejas con una gran cantidad de agentes en el espacio de trabajo. Los sistemas de control visual clásicos permiten realizar posicionamientos relativos entre el extremo del robot y los objetos situados en la escena. Sin embargo, no permiten definir la trayectoria que el extremo debe seguir para llegar a la posición deseada. Una gran cantidad de objetos en el espacio de trabajo puede provocar colisiones indeseadas si no se tiene en cuenta la trayectoria que el robot seguirá hasta la posición final. Dotar a los sistemas de control visual clásicos de la capacidad de seguimiento de trayectorias en la imagen no sólo permite resolver el problema en sí de controlar qué trayectoria seguirá el extremo, también permite resolver uno de los principales problemas de los sistemas de control visual: su estabilidad asintótica local. Los sistemas de control visual basado en imagen son asintóticamente estables sólo de manera local. Es decir, sólo se puede asegurar su estabilidad cuando la posición inicial y la final están relativamente próximas. Si se especifica la tarea de posicionamiento a partir de una trayectoria, las referencias siempre estarán muy cercanas a la posición actual, y el sistema de control visual será más robusto.

Un aspecto que ha motivado especialmente el desarrollo de esta Tesis ha sido el de obtener un esquema de control visual capaz de realizar seguimientos de trayectorias especificadas en el espacio imagen. Hasta hace unos años las únicas propuestas encontradas para resolver el problema del seguimiento en sistemas de control visual presentaban un comportamiento temporal. Es decir, la trayectoria se muestrea y la posición siguiente del robot se obtenía como una función del tiempo. Así, si el sistema robótico no podía continuar debido a cualquier evento no contemplado, estas aproximaciones temporales seguían enviando referencias, con lo que se perdían, provocando el fallo del seguimiento. Hace poco tiempo han empezado a aparecer sistemas de seguimiento intemporales, en los que la siguiente referencia depende únicamente de la posición actual del robot, y no del tiempo. Sin embargo, ninguno de los métodos intemporales propuestos hasta ahora permite definir una velocidad de seguimiento.

Este último aspecto es aún más interesante cuando se habla de control visual directo. No se han encontrado trabajos que permitan resolver el problema del seguimiento de una trayectoria con control visual directo. Los esquemas de control visual directo requieren el conocimiento preciso de los parámetros dinámicos del robot. Esta información es difícil de estimar con exactitud, salvo que se esté presente en el diseño y construcción del robot. El diseño y construcción de un pequeño robot que se llevará a



cabo en el proyecto MCYT DPI2008-02647 del que soy investigador colaborador, ha motivado la investigación de estos sistemas de seguimiento utilizando control visual directo.

En tareas en las cuales el robot debe interactuar con su entorno (eliminación de soldaduras, atornillado, etc.) los sistemas de visión artificial no pueden proporcionar información acerca de la fuerza de interacción entre el extremo del robot y su entorno. El tener acceso a información procedente de un sensor de fuerza constituye un elemento indispensable para aplicaciones en las cuales los robots deben interactuar directamente con objetos del entorno. La propia naturaleza y la precisión limitada de los sistemas de visión artificial utilizados para el control de posición implican que este tipo de sistemas no son adecuados para controlar la interacción.

Las principales aproximaciones empleadas hasta la actualidad para combinar información visual y de fuerza son control híbrido y control de impedancia. En el caso de control híbrido, el espacio de control se divide en direcciones controladas por fuerza y direcciones controladas por visión siendo requisito para aplicar esta estrategia el disponer de un conocimiento previo detallado de la geometría de la tarea y el entorno en el que se va a desarrollar. En el caso de emplear control de impedancia se especifica la relación dinámica entre fuerza y movimiento. En cualquier caso, el espacio de trabajo se supone conocido a priori, lo que constituye una limitación de cara a su aplicación a entornos de reciclado. A partir de estos trabajos se observa la necesidad de crear un nuevo sistema de control visual-fuerza que sea capaz, no solo de controlar una misma dirección de movimiento, sino hacerlo de manera que se eviten posibles contradicciones en las acciones de control obtenidas a partir de ambos sistemas sensoriales.

En aquellas tareas en las que se debe realizar la manipulación de un determinado objeto del espacio de trabajo se hace necesario el uso de forma combinada de los controladores visuales junto con controladores de fuerza. En este caso los sistemas de visión tienen la función de establecer la trayectoria del robot durante la tarea, actuando como controladores de posición, mientras el sistema sensor de fuerza se encarga de controlar la interacción del robot con el entorno. Existen aproximaciones que permiten modificar la posición deseada a partir de las fuerzas de interacción. Sin embargo, no se han encontrado aplicaciones que permitan fusionar la información pudiendo desarrollar la tarea ante incertidumbres en los parámetros de la cámara y sin la necesidad de realizar una calibración cinemática previa.

En esta Tesis se plantean distintas técnicas de control de robots capaces de permitir resolver tareas complejas de manera automática o semi-automática. Se plantea un sistema de seguimiento intemporal de trayectorias en el espacio imagen, que permite posicionamientos precisos y seguros al mismo tiempo que mejora el comportamiento de los sistemas de control visual clásicos. Este sistema de seguimiento se mejora con un método de calibración on-line de la cámara. A partir de la referencia de velocidad que proporciona el método de seguimiento se construye un sistema de control visual-fuerza basado en un esquema de impedancia que permite al robot interactuar con su entorno controlando las fuerzas y pares ejercidos. Además, se plantea un método de seguimiento intemporal de trayectorias utilizando control visual directo, de manera que se obtengan directamente los pares y fuerzas a aplicar al robot para seguir correc-

tamente la trayectoria deseada y se evite tener que utilizar el controlador interno del manipulador.

## 1.2 Marco de la Tesis

Esta Tesis se ha desarrollado dentro del ámbito de la beca FPI de la Generalitat Valenciana (BFPI06/015) y de tres proyectos de investigación.

El primer proyecto de investigación es: “Diseño, Implementación y Experimentación de Escenarios de Manipulación Inteligentes para Aplicaciones de Ensamblado y Desensamblado Automático” financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología (DPI2005-06222), cuyo principal objetivo es el de diseñar, implementar y experimentar un escenario inteligente, adecuadamente sensorizado, que permita abordar con garantías tareas complejas de manipulación tales como ensamblado y desensamblado, a realizar bien de forma totalmente automática por un sistema multirobot, o semi-automáticamente con intervención humana.

Tanto el ensamblado como el desensamblado automáticos requieren un alto grado de flexibilidad y adaptabilidad a los distintos cambios que puedan surgir durante el propio proceso debido a la incertidumbre existente con respecto al producto a desensamblar, al estado de conservación del mismo, al gran número de fabricantes existentes y su gama de productos, etc. Todo ello confiere un grado de dificultad superior, siendo necesarios sistemas de guiado de robots que empleen sistemas multisensoriales [Tórreres-2004].

Uno de los pilares de este proyecto, y donde se enmarca la presente Tesis, es la investigación de sistemas multisensoriales capaces de permitir interacción no sólo con los objetos situados en su entorno, sino también con operadores humanos cuya presencia se requiera en la tarea de ensamblado o desensamblado. Para obtener una medida de la interacción con los objetos del espacio de trabajo se utilizan elementos como los sensores de fuerza. La información visual que proporcionan las cámaras permite realizar tareas de posicionamiento del robot en relación a los objetos que se pueden ver desde la cámara. Sin embargo, ninguno de los sensores por separado son capaces de obtener información suficientemente precisa para realizar tareas de ensamblado y desensamblado como las que se desarrollan en este proyecto. La fusión de la información proporcionada por cada sensor hace al sistema más completo, preciso y robusto. En una tarea de pulido, por ejemplo, la información de la fuerza ejercida por el extremo del robot puede complementar a la obtenida con visión, de forma que la acción de control visual se modifique para guiar al robot sobre la superficie manteniendo una fuerza de contacto deseada. La interacción de cualquier sistema robótico industrial con operadores humanos debe partir siempre desde la base de la seguridad. El operador humano puede interferir en la tarea que el manipulador robótico esté realizando, pero si la estrategia de seguridad obliga al robot a alejarse del humano o incluso a pararse, cuando el humano desaparezca del espacio de trabajo, el robot debe retomar la tarea que estaba realizando. En tareas de seguimiento de trayectorias con control visual, un comportamiento intemporal del sistema permitirá al robot retomar la tarea sin problemas una vez que el humano se aleje de éste. Las estrategias de seguimiento intemporal de trayectorias, así como la estrategia global de control visual-fuerza aportados en esta Tesis constituyen una de las piezas clave para alcanzar los objetivos fijados en el proyecto.

Otro de los proyectos en el que se enmarcan las investigaciones desarrolladas es el proyecto de investigación “Diseño y experimentación de estrategias de control visual-fuerza para sistemas flexibles de manipulación” financiado por la Generalitat Valenciana. En este proyecto se desarrolla la estrategia de control visual más adecuada para realizar el guiado del robot con las características visuales más adecuadas y determinando de forma automática y sin conocimiento previo los parámetros intrínsecos del sistema de visión. Por otro lado, se estudian los sistemas de control de fuerza a aplicar, así como su combinación con los anteriores para su actuación de forma conjunta. Uno de los objetivos del proyecto es el desarrollo de un nuevo algoritmo de fusión control visual-fuerza que permita al robot adaptarse a las características geométricas del objeto manipulado, no requiriendo una planificación previa de las direcciones a ser controladas por cada sensor.

Las últimas investigaciones realizadas se enmarcan dentro del proyecto financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología “Manipulación inteligente mediante percepción háptica y control visual empleando una estructura articular ubicada en el robot manipulador (DPI2008-02647)”. La finalidad del proyecto es la investigación en técnicas de manipulación inteligentes. Uno de los objetivos principales del proyecto es el desarrollo de estrategias de control visual para el guiado de robots empleando para ello una cámara ubicada en una estructura articular anclada en el extremo del robot manipulador. Para ello, se requiere el diseño de un mini-robot y el desarrollo de estrategias de control visual directo con el objetivo de asegurar que, durante toda la tarea llevada a cabo por el manipulador, la información visual requerida se encuentra en el campo de visión de la cámara.

### 1.3 Aportaciones

Los sistemas de control visual son asintóticamente estables únicamente de manera local. Es decir, la posición inicial de la cámara y la posición final deben estar lo suficientemente cerca para evitar caer en mínimos locales. Además, los sistemas de control visual basado en imagen clásicos sólo permiten obtener un posicionamiento punto a punto de la cámara, sin tener ningún control de la trayectoria 3-D que la cámara describe durante la tarea de control, ya que el control se realiza sobre el espacio imagen, no sobre el espacio 3-D. Para resolver estos dos problemas, a lo largo de la Tesis se describirá lo que significa una de las principales aportaciones: un sistema de seguimiento de trayectorias con control visual. A pesar de que en la literatura han aparecido en la última década una serie de trabajos que tratan el mismo problema, la gran mayoría de ellos resuelven el problema de la repetición de una trayectoria con un comportamiento temporal. Estos sistemas no permiten ningún tipo de evento ajeno al seguimiento de la trayectoria, ya que si el seguimiento se detiene antes de que se complete la trayectoria, las referencias temporales se perderán, y el sistema fracasará en su objetivo. Ese hecho descarta a los sistemas de seguimiento temporales para usarlos en sistemas multisensoriales, ya que cualquier información ajena a la obtenida por visión puede provocar eventos que el sistema no podría gestionar. Sólo recientemente han aparecido sistemas intemporales para el seguimiento de trayectorias utilizando control visual basado en imagen. Ninguno de ellos es capaz de definir la velocidad de seguimiento, presentando en general comportamientos muy oscilantes, o seguimientos donde el robot para en

cada referencia de la trayectoria. Así, una de las principales aportaciones de esta Tesis es un sistema de seguimiento intemporal basado en control visual virtual que permite especificar una velocidad de seguimiento.

Los sistemas de control visual virtual permiten obtener los parámetros extrínsecos e intrínsecos de una cámara real realizando variaciones de estos parámetros en una cámara virtual, de forma que al converger el sistema, se tengan en la cámara virtual los parámetros reales. Estos sistemas dependen mucho de la inicialización de los parámetros extrínsecos para la cámara virtual. Una aportación de esta Tesis es la calibración multi-imagen, que permitirá obtener de forma precisa la calibración de la cámara independientemente de la inicialización de los parámetros extrínsecos al mismo tiempo que se realiza una tarea de control visual. Además, se aporta un método capaz de ajustar el número de imágenes necesarias en cada momento para obtener una estimación válida de los parámetros intrínsecos del sistema de visión. El conocimiento de los parámetros intrínsecos reales a lo largo de la trayectoria seguida usando el método de seguimiento de trayectorias en la imagen basado en control visual virtual permite mejorar su comportamiento en imagen y en 3-D, así como realizar el seguimiento en condiciones cambiantes de los parámetros intrínsecos de la cámara, como por ejemplo la realización de zoom.

Otra de las aportaciones principales de esta Tesis son tres sistemas de seguimiento intemporal de trayectorias con control visual directo. Las tres aproximaciones permiten desde realizar el seguimiento con una velocidad mínima garantizada a obtener un seguimiento con una velocidad deseada constante. Estos controladores propuestos permiten obtener directamente los pares y fuerzas que guíen al robot a lo largo de la trayectoria con las condiciones de velocidad que cada método establece. Al controlar directamente las articulaciones del robot y eliminar el controlador interno, se consigue eliminar los retardos que éste pudiera introducir.

Los sistemas de control visual no permiten controlar la interacción con la suficiente precisión. Cuando el robot entra en contacto con algún objeto de su entorno, la medida de las fuerzas y pares ejercidos por el extremo permitirán obtener información local precisa del contacto. En esta Tesis se presenta un esquema de fusión control visual-fuerza que permite obtener una acción de control global que cumpla las restricciones impuestas por el sistema de control visual y el sistema de control de fuerza. Las principales aportaciones en este esquema empiezan con un esquema de impedancia que es realimentado por un sistema de seguimiento intemporal basado en control visual.

Así, se ha obtenido un sistema capaz de controlar la interacción del robot con el entorno mientras realiza el seguimiento de una trayectoria en la imagen. Cuando se detecta una colisión con el entorno de trabajo, se recalcula la trayectoria deseada en la imagen de forma que se cumplan las restricciones introducidas por las fuerzas de interacción. Se presentan aquí dos aportaciones que permiten realizar esta modificación de la trayectoria a partir de las fuerzas leídas. El primer método permite recalcular la trayectoria en la imagen a partir de la matriz de homografía 2-D. El segundo de los métodos para recalcular la trayectoria en la imagen no requiere conocimiento a priori del modelo cinemático del robot, la calibración de la cámara o de calibración sensorial entre la cámara y el sensor de fuerza. Este segundo método se

basa en estimar la matriz de interacción fuerza-imagen, que consigue relacionar variaciones en la imagen con variaciones en las fuerzas, permitiendo obtener una relación directa entre ambos sistemas sensoriales.

Por último, cuando el sistema interactúa con una nueva superficie, el sistema debe recalcular la trayectoria deseada en la imagen. Por ello, se introduce una última aportación que describe un sistema capaz de detectar de manera robusta los cambios en las superficies a partir de la información del sensor de fuerzas y de patrones de luz estructurada.

## 1.4 Estructura de la Tesis

A continuación se detalla la estructura de la Tesis. Tras este Capítulo de introducción, en el 2 se detallan conceptos fundamentales relativos a los sistemas de control visual y control visual virtual, prestando mayor atención a aquellos en los que se centrarán las aportaciones realizadas a lo largo de la Tesis. Este primer capítulo no sólo es puramente descriptivo de los sistemas de control visual, sino que además se detallan las distintas tendencias en la investigación en esta materia, mostrando las carencias que se pretenden resolver con la realización de esta Tesis Doctoral.

Los capítulos 3, 4, 5 y 6, parte central de esta Tesis, describen las aportaciones realizadas. Se ha procurado un nivel alto de detalle que permita la fácil comprensión de los algoritmos propuestos, manteniendo el formalismo necesario, así como mostrar distintos experimentos teóricos y prácticos que avalen las aportaciones realizadas.

El bloque central de la Tesis empieza con la descripción de un nuevo método de guiado de robots por visión, denominado seguimiento intemporal de trayectorias en la imagen basado en control visual virtual, que resuelve las carencias de los sistemas de control visual desarrollados hasta la actualidad para el seguimiento de trayectorias. Este método descrito en el Capítulo 3 no sólo consigue obtener un comportamiento intemporal, sino que además hace uso de la calibración multi-imagen que se describirá en el Capítulo 4 para mejorar el comportamiento en la imagen y realizar el seguimiento a pesar de variaciones en los intrínsecos en tiempo real. En este Capítulo, tras realizar una descripción detallada del método, se muestran distintos resultados experimentales con los que se comprueba la correcta respuesta del mismo y se muestra su comportamiento frente a otros métodos de seguimiento temporal e intemporal de trayectorias en la imagen y ante la variación de los distintos parámetros que rigen su funcionamiento.

En el Capítulo 4 se describe la calibración de una cámara a partir de una imagen tomada por ésta. La calibración de la posición de la cámara respecto a un objeto se consigue de forma sencilla a partir de la aplicación de control visual virtual. Sin embargo, la obtención precisa de los parámetros intrínsecos de la cámara no se consigue cuando se usa una sola imagen. En el Capítulo 4 se describirá la técnica de la calibración multi-imagen, que permite obtener los parámetros extrínsecos e intrínsecos de una cámara mientras realiza una tarea de control visual.

El Capítulo 5 muestra tres estrategias distintas para realizar el seguimiento de trayectorias utilizando control visual directo. Estas aproximaciones se prueban sobre un



entorno simulado sobre un prototipo de robot de 2 grados de libertad que se ha diseñado en el marco del proyecto MCYT (DPI2008-02647) mencionado en el Apartado 1.2.

El bloque central de la Tesis finaliza con el Capítulo 6, en el que se describen las aportaciones realizadas dentro del campo de la fusión de los sistemas de control visual con los de fuerza. En este capítulo se incluyen los elementos necesarios a la estrategia de seguimiento empleando visión descrita en el Capítulo 3, para permitir la utilización de control de fuerza y su aplicación a tareas de manipulación.

El Capítulo 7 describe distintas pruebas experimentales que validan los esquemas de control descritos en los capítulos anteriores.

En el Capítulo 8 se resumen las principales conclusiones que se han derivado de la realización de la Tesis, describiendo las publicaciones generadas y los posibles trabajos futuros relacionados con las investigaciones desarrolladas. Finalmente, la Tesis concluye con la lista detallada de las referencias bibliográficas consultadas.



Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante

# Control Visual

## 2 Control Visual

Este capítulo presenta las técnicas de control de un robot manipulador por medio de la información visual proporcionada por una o más cámaras. Una revisión histórica inicial permite observar la evolución creciente de esta técnica de control de robots gracias, sobre todo, a la mejora en los tiempos de adquisición y procesamiento de las imágenes. Los sistemas de control visual se han implantado de muy diversas formas en los sistemas robóticos. Esto hace que se hayan realizado varias clasificaciones de estos sistemas dependiendo de ciertos factores de diseño. Así, una primera clasificación permite definir a un sistema de control visual en función de la arquitectura del sistema de visión: sistemas “*eye-in-hand*” o sistemas “*eye-to-hand*”. Otra clasificación importante separa los sistemas de control visual en función del diseño del lazo de control: control visual en lazo abierto, control visual indirecto y control visual directo. Pero quizás la clasificación más extendida es la que separa los sistemas de control visual en función de las características utilizadas como entrada a la ley de control: control visual basado en posición y control visual basado en imagen. Los sistemas de control visual

2.1	<b>Revisión histórica</b> .....	9
2.1.1	Introducción.....	9
2.1.2	Arquitectura del sistema de visión.....	12
2.1.3	Clasificación de los sistemas de control visual ...	14
2.2	<b>Control visual basado en imagen</b> .....	23
2.2.1	Estado del arte en control visual indirecto basado en imagen .....	24
2.2.2	Matriz de interacción.....	30
2.2.3	Controlador utilizando la matriz de interacción.....	36
2.2.4	Estabilidad en el sentido de Lyapunov.....	38
2.2.5	Un primer ejemplo de tarea de control visual ....	42
2.3	<b>Control visual virtual</b> .....	45
2.3.1	Introducción.....	45
2.3.2	Formulación .....	48
2.4	<b>Conclusiones</b> .....	51

basado en imagen serán la base de la mayor parte de los desarrollos presentados en la presente Tesis. Por ello, se estudiarán en detalle en el presente Capítulo, remarcando sus ventajas e inconvenientes. Finalmente, se presentará la técnica de control visual virtual como método de calibración on-line de los parámetros extrínsecos e intrínsecos de la cámara.

### 2.1 Revisión histórica

#### 2.1.1 Introducción

Inicialmente, los sistemas robóticos que integraban visión por computador trabajaban en bucle abierto, lo que se conoce como “ver y mover” (en la literatura anglosajona se referencia como “*look and move*”). Es decir, en primer lugar ver y reconocer el entorno con ayuda de un sistema de visión por computador, y posteriormente realizar el

movimiento en función de la información capturada en la etapa previa. Una de estas primeras aplicaciones de guiado de robots por visión fue la desarrollada por Shirai e Inoue [Shirai-1973], quienes describen cómo puede utilizarse la realimentación visual para corregir la posición de un robot y aumentar la precisión. Esta primera aplicación consistía en utilizar realimentación visual para el guiado de un robot de forma que realice el agarre de un prisma y su posterior inserción en una caja. Durante esta década se desarrollaron las primeras aplicaciones de control visual para el agarre de objetos en movimiento por cintas transportadoras. Los sistemas de control visual en bucle abierto sólo permiten trabajar en entornos muy estructurados, donde tanto el espacio de trabajo, como los objetos situados en él se mantengan en la misma posición durante toda la tarea. Además, estos sistemas confían la correcta finalización de la tarea en la imagen obtenida en una fase previa al movimiento. Este hecho supone tener los sistemas robótico y de visión calibrados de una manera muy precisa.

Una alternativa al planteamiento anterior es emplear control en bucle cerrado mediante realimentación de la información visual para controlar la localización del efector final del robot con relación a un objeto, lo que también se conoce en la literatura anglosajona como visual servoing (término definido por Hill y Park [Hill-1979]). Por tanto, el control visual está basado en el uso de información visual en la realimentación del bucle de control. Más concretamente, un sistema de control visual utiliza la información captada de una escena por una o más cámaras conectadas a un sistema de visión por computador, para controlar la localización del efector final del robot con relación a la pieza de trabajo.

En 1980 Sanderson y Weiss [Sanderson-1980] establecen una clasificación de los sistemas de control visual, describiendo asimismo el primer sistema de control visual basado en imagen. Desde la aparición de estos primeros sistemas de control visual a principios de los 80, su evolución ha sido lenta, sin embargo en los últimos años han aparecido crecientemente nuevos desarrollos debidos principalmente a las capacidades de procesamiento de los nuevos ordenadores personales que permiten procesar una escena a una frecuencia cada vez mayor.

Ya a finales de los 80 comienza a aplicarse el control visual a muy distintos ámbitos como puede ser el agrícola, en el que se encuentran aplicaciones para la recogida de frutas empleando realimentación visual [Harrell-1989], o la teleoperación de robots. Dentro de este último ámbito el control visual permite al operador humano especificar la tarea en términos de características en la imagen [Papanikolopoulos -1992, Vikramaditya-1997]. En [Corke-1993] se presentan las distintas aplicaciones de control visual desarrolladas durante estos finales de los 80 y principios de los 90.

A partir de los 90 y con el aumento de las capacidades de los sistemas de visión artificial aparecen un gran número de aplicaciones. Dentro de este incipiente conjunto de aplicaciones cabe mencionar algunas como el guiado de vehículos [Dickmanns-1988, Martinet-2000] en las que se requiere una gran capacidad de procesamiento y una alta frecuencia en la realimentación visual. Otro ámbito en el que el control visual presenta una importancia creciente en la actualidad es el del guiado de robots aéreos [Campoy-2008]. Aplicaciones dentro de este ámbito no han sido explotadas en gran medida, sin embargo, ya empiezan a surgir vehículos aéreos, como helicópteros [Chriette-2001, Merino-2006, Yoshihata-2009], dotados de un sistema de visión que realimenta al con-

trolador del vehículo de forma que permite realizar su guiado a partir de características del entorno, evitando obstáculos e incluso permitiendo realizar un aterrizaje automático [Azinheira-2008]. El desarrollo de sistemas de control visual en estos vehículos permite realizar aplicaciones como vigilancia, inspección [Mejias-2006a], seguimiento, trabajo en lugares peligrosos, etc.

Con la miniaturización y el aumento de precisión de los componentes de los robots, van aumentando las posibilidades de la micromanipulación empleando realimentación visual procedente, por ejemplo, de microscopios. Dentro de este ámbito cabe destacar que cuando se observan microorganismos, los elementos desaparecen del campo de visión muy rápidamente. Se vienen aplicando en la actualidad sistemas de control visual con el objetivo de mantener en la imagen a lo largo del tiempo ciertos microorganismos con el propósito de su posterior manipulación [Oku-2000, LiuXY-2008]. En esta línea, el uso de microscopios permite realizar el ensamblado de circuitos integrados cada vez más pequeños. El control visual se ha venido aplicando en el control de sistemas encargados de realizar estos microensamblajes [Feddema-1998, Xiangjin-2008].

Esta mejora en el desempeño de los sistemas robóticos y de visión artificial ha propiciado la aparición de aplicaciones a robots submarinos [Lots-2001, Sattar-2005, Bonin-Font-2008]. En este caso se dispone de vehículos submarinos guiados por visión o sistemas de manipulación submarina cuya tarea es guiada mediante realimentación visual.

Un ámbito de aplicación con mayor impacto social son las aplicaciones médicas [Guo-Qing-1997, Ginhoux-2005, Krupa-2009]. La alta precisión alcanzada con estos sistemas ha propiciado la aparición de sistemas para la realización de telecirugía así como robots que realizan tareas quirúrgicas de forma autónoma. A pesar de que estos sistemas aumentan el coste por intervención, la alta precisión junto con el pequeño espacio de trabajo requerido en, por ejemplo, cirugía cerebral, hace que estos sistemas se apliquen con éxito. Dentro de este ámbito y volviendo a las aplicaciones de guiado de vehículos son de destacar las investigaciones para aplicación de control visual en el guiado de sillas de ruedas para discapacitados [Versluis-2004].

Otro ámbito de interés en control visual es el de la vigilancia [TsaiMC-2003]. En muchas ocasiones el sistema de visión se localiza sobre una estructura móvil de forma que es capaz de mantener en el campo de visión un determinado objeto que se encuentra bajo vigilancia.

En la actualidad, las mejoras de los tiempos de procesamiento de los ordenadores han permitido a las aplicaciones de robótica basadas en visión desarrollarse en tiempo real. Esto ha hecho posible incluir las características extraídas de las imágenes en un bucle de control. De hecho, en la actualidad encontramos aplicaciones muy diversas en el ámbito del control visual como puede ser posicionamiento preciso de un robot, control remoto o realimentación para teleoperación [Wirz-2004], micromanipulación [Feddema-1998, Xiangjin-2008], agarre de objetos en movimiento [Pérez-2009], sistemas de posicionamiento de un avión sobre la pista de aterrizaje [Bourquardez-2007], cámaras de seguimiento de misiles [Merritt-1997], aplicaciones espaciales [Dionnet-2009], recolección de frutas [Baeten-2008], robots que juegan al tenis [Sebastian-2007], ensamblado

de estructuras metálicas [Gil-2009b, Pomares-2009], cambio de bombilla en farolas [GarcíaGJ-2009d, Pomares-2010], etc.

### 2.1.2 Arquitectura del sistema de visión

Uno de los factores a los que se debe el auge actual en los sistemas de control visual es el desarrollo de nuevos sistemas de visión. Estos nuevos sistemas han propiciado que la información visual sea cada vez más utilizada, debido a la disminución de retardos de captura y procesamiento, lo que a su vez ha permitido el desarrollo de sistemas basados en distintas arquitecturas. En este apartado se describen las configuraciones más utilizadas para la ubicación de cámaras (una o varias) respecto al robot y al espacio de trabajo donde se desarrolla la tarea.

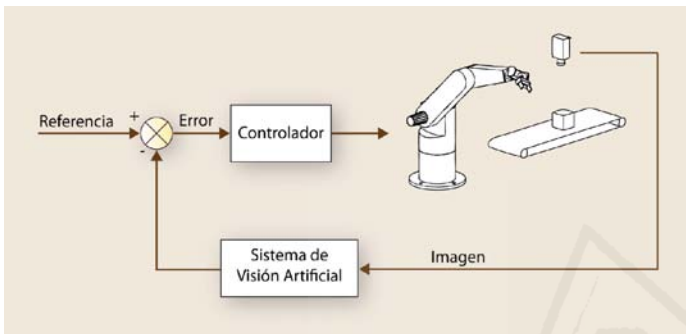


Fig. 2-1 Componentes principales de un sistema de control visual

Supóngase una aplicación en la que un robot deba realizar el agarre de un objeto en movimiento. Los componentes más importantes en un sistema de control visual para una aplicación de seguimiento de este tipo son los mostrados en la Fig. 2-1.

En la Fig. 2-1 se representa un esquema genérico en el que se observa el bloque denominado “sistema de visión artificial” que es el encargado

de procesar las imágenes y realimentar constantemente al sistema con esta información. La entrada al sistema de control es una referencia, de manera que el error que anula el controlador es la diferencia entre el valor actual y el deseado. Este controlador se encarga de dirigir el manipulador hacia la pieza que se está siguiendo.

Es posible ubicar la cámara en diferentes posiciones. En muchas ocasiones se monta

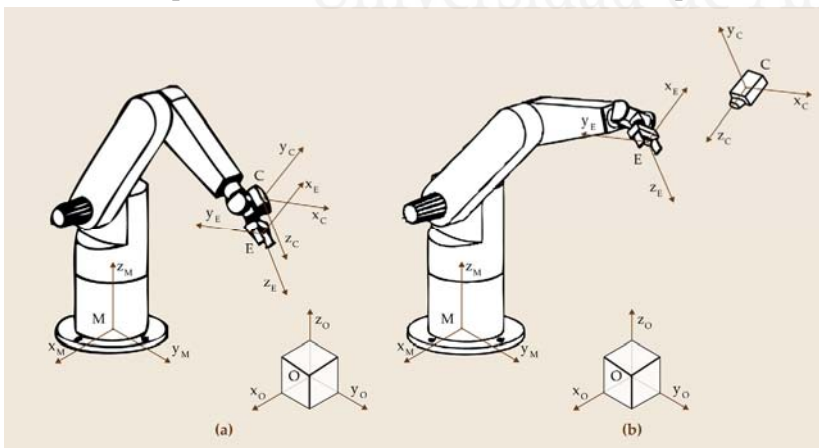


Fig. 2-2 (a) Configuración de cámara montada en el extremo del robot. (b) Configuración de cámara externa

en el extremo del robot (Fig. 2-2.(a)), en este caso observa el entorno en el que se realiza la tarea. Sin embargo, para la realización de otras tareas puede ser necesario que la cámara observe tanto al robot como a su entorno. En este último caso se suele utilizar un sistema de cámara fija o montada en un segundo robot (Fig. 2-2.(b)).

#### 2.1.2.1 Cámara externa al robot

La configuración de cámara externa al robot se denomina en la literatura anglosajona configuración “eye-to-hand”. En este caso la cámara no tiene una relación mecánica



con el robot que está siendo controlado visualmente, pero es conocida la relación entre la cámara y el sistema de coordenadas asociado a la base del robot. En principio, la vista obtenida es fija, salvo que la cámara esté ubicada sobre una estructura móvil. Una variante consiste en ubicar la cámara en el extremo de otro robot o bien emplear un cabezal con movimientos pan-tilt, con el propósito de conseguir visualizar el robot de la mejor forma. La cámara se posiciona de manera que el elemento terminal y los objetos situados en el espacio de trabajo del robot se encuentren en su campo de visión. Con esta configuración la información visual va a permitir obtener la localización tanto de un objeto situado en el espacio de trabajo como la del extremo del robot.

En la Fig. 2-2.(b) se muestran los sistemas de coordenadas principales utilizados en un sistema de control visual en el que el sistema de visión está compuesto por una única cámara fija observando el espacio de trabajo y el extremo del robot. La tarea a realizar se va a indicar respecto al sistema de coordenadas del mundo o de referencia,  $M$ , situado en la base del robot. Se conoce la relación entre los sistemas de coordenadas de la Fig. 2-2.(b) de manera que se pueda comparar la localización del extremo del robot y la del objetivo a alcanzar utilizando un mismo sistema de coordenadas de referencia.

En el plano imagen de la cámara fija se obtiene una representación 2-D del espacio de trabajo a partir de la cual se extraen las características necesarias para el desarrollo de la tarea (posición de un objeto, su tamaño, centroide...). Estas características están expresadas respecto al sistema de la cámara,  $C$ , para referirlas respecto al sistema de coordenadas del mundo,  $M$ ; se necesitará disponer de la información acerca de la localización relativa entre la cámara y la base del robot,  $T_C^M$ , que permita realizar la transformación de coordenadas.

Por otro lado, en una aplicación de control visual en la que el robot deba interactuar con los objetos del espacio de trabajo, será necesario disponer de información acerca de la localización del extremo del robot referida al sistema de coordenadas de referencia,  $M$ . Esta información podrá extraerse igualmente a partir de la información visual procedente del sistema de visión, realizando la suposición de que el sistema de visión capta información tanto del espacio de trabajo como del extremo del robot. Con esto, ya se dispondrá de información relativa al robot y al espacio de trabajo referida a un único sistema de coordenadas, el del mundo,  $M$ . En ocasiones el número de cámaras puede ser mayor que uno para realizar una reconstrucción geométrica del entorno más fiable. La Fig. 2-3 muestra un ejemplo de sistema de control visual con cámara externa al robot que utiliza un par estéreo.

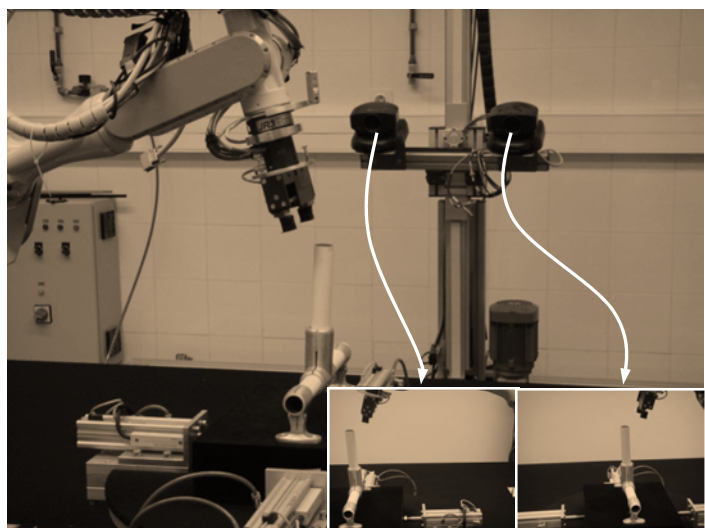


Fig. 2-3 Arquitectura de cámara-robot donde la cámara externa es un par estereoscópico montado en un robot cartesiano

### 2.1.2.2 Cámara en el extremo del robot

En esta solución, denominada en la literatura anglosajona como “eye-in-hand”, la cámara se encuentra solidaria al extremo del robot de manera que los objetos del espacio de trabajo se encuentran dentro de su campo visual. En este caso el sistema de visión se emplea para determinar la localización de un objeto con respecto al extremo del robot.

En la Fig. 2-2.(a) se ha representado la ubicación de los distintos sistemas de coordenadas utilizados en un sistema de control visual con una cámara colocada en el extremo del robot. En este caso la relación entre el sistema de coordenadas del extremo del robot,  $E$ , y el de la cámara,  $C$ ,  $T_C^E$  es conocida y fija durante el desarrollo de la tarea.

En la Fig. 2-4 se muestra un ejemplo de sistema de control visual con configuración de cámara en el extremo del robot.

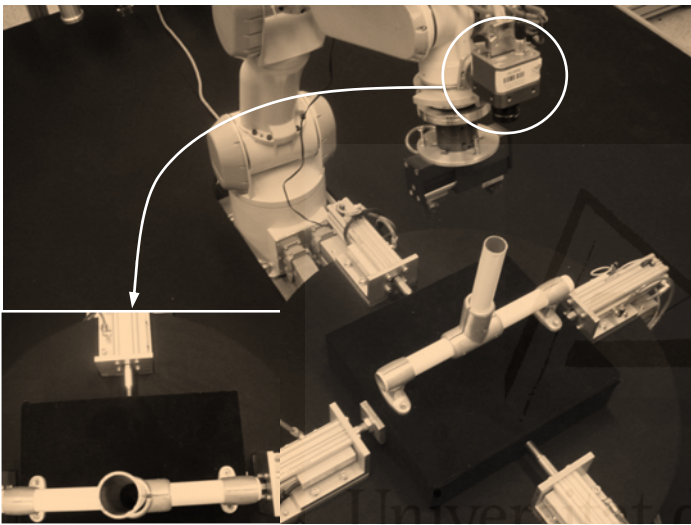


Fig. 2-4 Arquitectura de cámara-robot donde la cámara está situada en el extremo del robot.

Esta configuración permite obtener un mejor punto de vista de los objetos que el robot debe manipular, obteniendo en líneas generales una mayor precisión dado que la cámara se encuentra muy cerca de la acción. Evita en un mayor grado que la configuración “eye-to-hand” las oclusiones. Sin embargo, la configuración “eye-in-hand” pierde normalmente de vista los objetos en tareas de agarrar, dado que las herramientas situadas en el extremo del robot suelen tapar la vista.

### 2.1.3 Clasificación de los sistemas de control visual

En este apartado se va a mostrar una clasificación de los sistemas de control visual. En primer lugar, atendiendo al tipo de arquitectura y enfoque del problema de control visual (Apartados 2.1.3.1, 2.1.3.2 y 2.1.3.3), posteriormente teniendo en cuenta la utilización de las características extraídas de la imagen (Apartado 2.1.3.4).

#### 2.1.3.1 Ver y mover estático

Inicialmente, los sistemas robóticos que integraban visión por computador trabajaban en bucle abierto, en una configuración secuencial, primero ver y reconocer, y a continuación mover. Obviamente, la precisión de la operación a realizar depende directamente de la precisión del sensor de visión y del efector final del robot. Como se observa en la Fig. 2-5, el robot ejecuta las tareas suponiendo que ningún objeto en el entorno se modifica desde que se realiza la captura de la imagen hasta que se lleva a cabo la tarea. En esta arquitectura la única realimentación presente es la de los bucles internos de control de los servomotores.



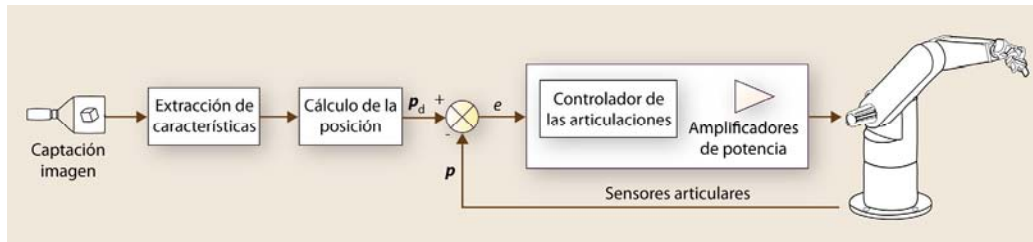


Fig. 2-5 "Ver y mover" estático

Supóngase una aplicación en la que un robot deba alcanzar la posición en la que se encuentra un objeto del espacio de trabajo. Para determinar la posición del objeto se utiliza un sistema de visión que indica en qué lugar se encuentra el objeto a alcanzar. Utilizando una estrategia de "ver y mover" estático, el robot se dirigiría a continuación hacia la posición indicada por el sistema de visión haciendo la suposición de que una vez alcanzada esa posición ya se habrá, asimismo, alcanzado el objeto. Por lo tanto, no se comprueba, ni durante la trayectoria del robot ni una vez alcanzada la posición final, que efectivamente se haya alcanzado al objeto, con lo que se supone que, desde que se obtuvo la posición con el sistema de visión hasta que se alcanza la posición final, no se ha alterado la posición del objeto.

### 2.1.3.2 Ver y mover dinámico

Sobre el sistema "ver y mover" anterior, que se podría decir que es estático, se puede añadir una realimentación visual obteniendo otro tipo de sistema de control visual denominado "ver y mover" dinámico. Como se observa en la Fig. 2-6, en este tipo de arquitectura el sistema de visión es usado en un primer bucle de realimentación; existe un segundo lazo interno donde se realimenta la información articular (con una velocidad de muestreo mayor). Se realiza lo que se denomina un control visual indirecto, y frente al "ver y mover" estático, permite realimentarse visualmente mientras el robot se encuentra realizando la tarea.

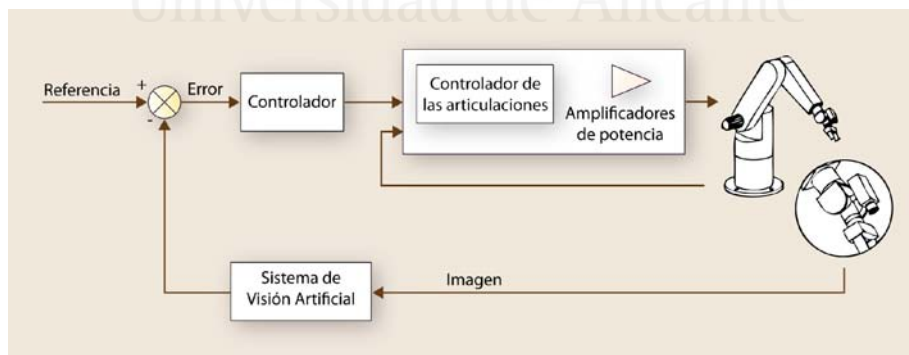


Fig. 2-6 "Ver y mover" dinámico

Utilizando el ejemplo presentado en el Apartado 2.1.3.1, si se empleara una estrategia de tipo "ver y mover" dinámico, el sistema se realimentaría constantemente con la información visual. Esta continua realimentación permitiría al sistema corregir posibles errores en la posición del objetivo determinada en instantes anteriores o modificar la trayectoria del robot ante posibles movimientos en los objetos del espacio de trabajo.

### 2.1.3.3 Control visual directo

Una alternativa al planteamiento anterior es emplear control en bucle cerrado mediante realimentación de la información visual para controlar la localización del efector final del robot con relación a un objeto, lo que también se conoce como control visual directo. En este caso no se requiere el bucle de control a nivel articular (Fig. 2-7), presentando sólo el bucle externo de control basado en la información visual, en el cual se calculan las consignas para cada una de las articulaciones del robot.

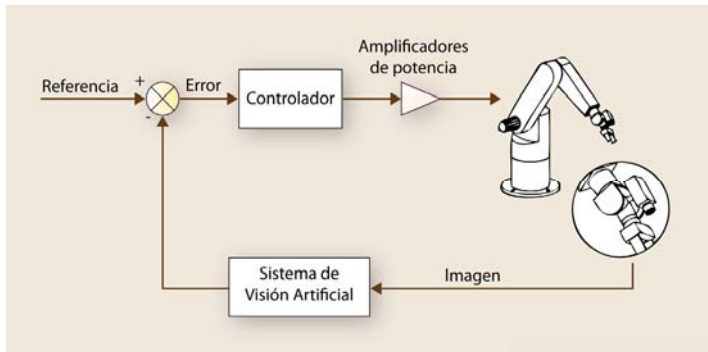


Fig. 2-7 Control visual directo

Retomando el ejemplo mostrado en los Apartados 2.1.3.1 y 2.1.3.2, si se utilizara un control visual directo, al igual que en el caso de “ver y mover” dinámico el sistema se realimentará constantemente con información visual del entorno; sin embargo, en este caso no estará presente el controlador del robot. Este último regulador será sustituido por el controlador visual que utiliza

información procedente del sistema de visión directamente para regular y estabilizar al sistema.

Los primeros trabajos encaminados hacia el diseño de reguladores PI y PID en sistemas de control visual directo se deben a Weiss [Weiss-1987] o más recientemente los trabajos de Kelly et al. [Kelly-2000, PerezRR-2009]. Dentro de este tipo de control visual cabe mencionar los estudios de Corke [Corke-1996a] en los que se realiza el diseño de reguladores mediante la introducción de polos, o los de Hashimoto [Hashimoto-1996] dirigidos hacia el desarrollo de técnicas de control óptimo considerando el caso en el que se hace uso de características visuales redundantes, o los trabajos de Gangloff [Gangloff-1998] centrados en el desarrollo de un controlador predictivo que tenga en consideración la dinámica total del sistema robot y la cámara. Dentro de esta línea de investigación cabe mencionar los trabajos de Nelson, Papanikolopoulos y Khosla [Nelson-1993] que aplicaron sus desarrollos a tareas de ensamblado. Cabe citar asimismo los trabajos descritos en [GarcíaN-2002] o los de Nasisi y Carelli [Nasisi-2003] que hacen uso de reguladores adaptativos para posicionamiento y seguimiento. Este control visual directo se emplea en aplicaciones con un requerimiento importante de velocidad, como el control visual de un robot paralelo para golpear una pelota de ping-pong descrito en [Angel-2008]. El principal problema que presenta es la dificultad de su implementación, ya que se debe obtener un modelo preciso de la dinámica del robot que permita obviar su controlador interno y trabajar directamente sobre las articulaciones con la realimentación visual.

### 2.1.3.4 Control basado en posición y basado en imagen

Se suele introducir una segunda clasificación [Sanderson-1980] de los sistemas de control visual que se realiza dependiendo si el control se ejecuta basado en posición o basado en características extraídas de las imágenes. En los sistemas de control basados en posición se dispone de un modelo del espacio de trabajo de forma que, a partir de

las características extraídas del sistema de visión, se estima la localización del objeto a alcanzar respecto al sistema de coordenadas de la cámara. Esta localización estimada se compara a su vez con la deseada o de referencia; la diferencia entre ambas localizaciones será la entrada al regulador. A su vez, teniendo en cuenta la clasificación dada en los apartados anteriores, se pueden establecer las siguientes configuraciones para los sistemas de control visual basados en posición:

- “Ver y mover” estático basado en posición. Este esquema se corresponde con el mostrado en la Fig. 2-5, en el que se observa que las características extraídas son traducidas a una localización,  $p_d$ , en la que se desea que se posicione el robot.
- “Ver y mover” dinámico basado en posición. Esta arquitectura se muestra en la Fig. 2-8. En la realimentación del bucle de control se extraen las características observadas en la imagen a partir de las cuales se estima la localización del objetivo a alcanzar,  $p^c$  (posición),  $\varphi^c$  (orientación). La entrada de referencia al bucle de control es la localización deseada del robot,  $p_d^c$ ,  $\varphi_d^c$ . La diferencia entre ambas posiciones, referidas a un sistema común de referencia, es la entrada al regulador que se encargará de ir disminuyendo progresivamente esta distancia.

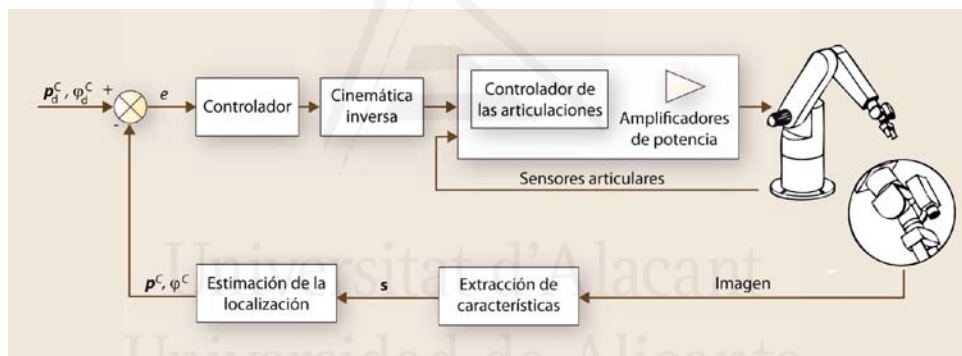


Fig. 2-8 “Ver y mover” dinámico basado en posición

Se observa, por lo tanto, la necesidad en este tipo de sistemas de estimar la localización. Una primera aproximación a la estimación de la localización de un objeto a partir de una imagen es la descrita por Lowe en 1987 [Lowe-1987]. Dentro de los trabajos de reconstrucción a partir de primitivas de tipo punto cabe resaltar la contribución de DeMenthon [DeMenthon-1995] consistente en una técnica iterativa que permite la estimación rápida de la posición de un objeto a partir de 4 puntos o más no coplanares, o a partir de 4 puntos coplanares [Oberkampff-1996]. En [David-2004] se desarrolla una modificación de este algoritmo para permitir simultáneamente la correspondencia y determinación de la posición a partir de los puntos. El uso de múltiples cámaras permite reconstruir por consenso la posición de un objeto visto desde las distintas cámaras [Jorstad-2008]. Asimismo, es posible encontrar trabajos encaminados a estimar la localización utilizando primitivas como segmentos. Así, cabe mencionar los estudios de Horaud [Horaud-1997] consistente en una adaptación del algoritmo de DeMenthon para el caso de extracción de segmentos. El uso de algoritmos genéticos permite obtener una estimación rápida de la localización a partir de una serie de imágenes. En [Abderrahim-2005] se comparan las técnicas geométricas de estimación con un

algoritmo genético denominado EvoPOSE. Otros trabajos reseñables dentro de control visual basado en posición son los de Allen [Allen-1991] en los que se estima la posición de un objeto móvil a partir de la medida del flujo óptico con un par estereoscópico y haciendo uso de filtros  $\alpha, \beta, \gamma$  para predecir la posición a alcanzar. Wilson [Wilson-1996] hace uso de un filtro de Kalman para estimar la posición relativa entre la cámara y el objeto. En este último trabajo se desarrolla un regulador PD en el espacio articular. Sandini y Grosso [Grosso-1996] estiman el estado del efector final de un robot a partir de la medida del flujo óptico con dos cámaras fijas. Los trabajos de Thuilot et al. [Thuilot-2002] tratan el problema de la pérdida del objeto durante la tarea de control visual basado en posición, para lo cual generan de manera iterativa una trayectoria que mantenga al objeto siempre en el campo de visión de la cámara. Cabe asimismo resaltar los trabajos de Martinet, Prats y Cervera [Martinet-1999, Cervera-2001a, Cervera-2003b, Prats-2008a] en sistemas estereoscópicos para su utilización en sistemas de control visual basados en posición, así como la inclusión de características 3-D en los sistemas de control visual basados en imagen. En estos trabajos, se presenta una modificación en el sistema de referencia sobre el que se mide la localización del objeto. El objetivo es lograr un mejor comportamiento en el espacio imagen del control visual basado en posición, evitando en la medida de lo posible que las características visuales se salgan del plano imagen. Por último, cabe asimismo mencionar los trabajos de Lippiello, Siciliano y Villani [Lippiello-2003, Lippiello-2007] centrados en el desarrollo de sistemas de control visual basados en posición haciendo uso de sistemas multi-cámaras para el seguimiento de objetos en movimiento. El principal inconveniente de los sistemas de control visual basado en posición es que para la estimación de la localización del objeto se requiere normalmente un modelo geométrico de éste.

- *Control visual directo basado en posición.* Este esquema, mostrado en la Fig. 2-9, utiliza al igual que en el caso anterior, un modelo del objetivo a alcanzar para determinar su localización a partir de las características observadas por el sistema de visión. La entrada de referencia también será la localización deseada del robot. Sin embargo, en este caso el regulador se encargará de realizar la estabilización del robot.

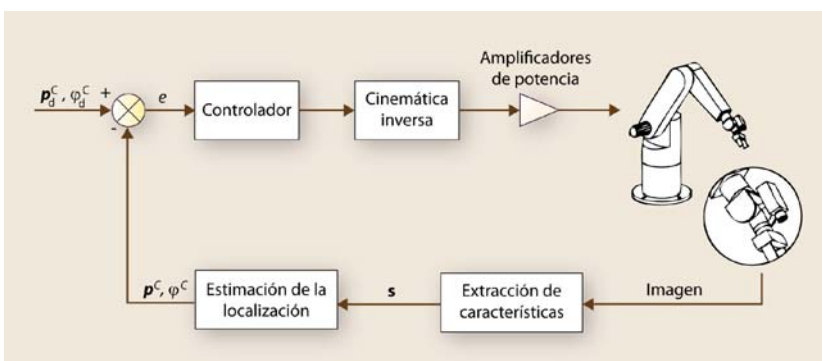























Fig. 2-9 Control visual directo basado en posición

Los trabajos presentados por Vargas y Rubio [Vargas-2003] describen un sistema de control visual directo basado en posición donde tanto el modelo geométrico del objeto como el modelo dinámico del robot se tienen en cuenta. En esta línea, los trabajos realizados por Sebastián [Sebastian-2007, Angel-2008] permiten realizar un control visual directo basado en posición sobre un robot paralelo desarrollado por su grupo de investigación, dado que se conoce con precisión su modelo dinámico.

La [Tabla 2-1](#) muestra un resumen de las distintas técnicas de control visual basado en posición desarrolladas en España durante las últimas dos décadas. En [\[GarciaGJ-2009b\]](#) se integran estos estudios previos a la realización de la presente Tesis, detallando con más profundidad cada uno de los trabajos mencionados en esta tabla.

Tabla 2-1 Resumen de la investigación española en control visual basado en posición

Leyenda del tipo de configuración	 Par estéreo	 Cámara simulada
	 Eye-in-hand	 Eye-to-hand
Referencia	Configuración	Técnica / Aplicación
<a href="#">[Cervera-1999a]</a>		Modificación del sistema de referencia entre cámara y objeto
<a href="#">[Cervera-1999b]</a> <a href="#">[Cervera-2003b]</a>	 	Control visual basado en posición
<a href="#">[Vargas-2000]</a>		Banco de pruebas para el esquema de control visual basado en posición clásico
<a href="#">[Cervera-2001a]</a> <a href="#">[Cervera-2001b]</a>	 	Control visual basado en posición
<a href="#">[Cervera-2002a]</a>		Simulador de control visual en Matlab/Simulink
<a href="#">[Cervera-2002b]</a>	 	Control visual basado en posición
<a href="#">[Bachiller-2003]</a>		Control visual basado en posición con estimador del movimiento del objeto
<a href="#">[Cervera-2003a]</a>	 	Banco de pruebas para el esquema de control visual basado en posición
<a href="#">[Vargas-2003]</a>		Control visual directo basado en posición de un robot de dos grados de libertad
<a href="#">[Wirz-2004]</a>		Laboratorio remoto a través de Internet para aprendizaje de las técnicas de control visual basado en posición
<a href="#">[Abderrahim-2005]</a>		Banco de pruebas para un reparador autónomo de satélites usando control basado en posición
<a href="#">[Angel-2004]</a> <a href="#">[Sebastian-2007]</a> <a href="#">[Angel-2008]</a>		RoboTennis: un robot paralelo que juega al tenis. Control visual directo basado en posición con estimador del movimiento del objeto
<a href="#">[Montijano-2008]</a>		Control visual basado en posición de un robot móvil usando las matrices de homografía para reconstruir la escena 3D



Por el contrario, en los sistemas de control basados en imagen, el control se realiza directamente a partir de las características extraídas por el sistema de visión, que representan la proyección del objetivo a alcanzar en el plano imagen. De esta manera, la entrada al regulador será una comparación entre las características observadas y las deseadas o de referencia. De nuevo, atendiendo a la clasificación dada en los Apartados 2.1.3.2 y 2.1.3.3 se pueden distinguir las siguientes configuraciones de sistemas de control visual basados en imagen:

- *Ver y mover dinámico basado en imagen.* La arquitectura para un sistema de este tipo se muestra en la Fig. 2-10.

La entrada de referencia,  $s_d$ , se expresa en forma de características observadas por el sistema de visión (puntos, segmentos, círculos, esquinas...). En la realimentación del sistema se encuentra el sistema de visión que se encarga, durante el desarrollo de la tarea, de realizar la extracción de estas características,  $s$ . El regulador, comparando las características reales y deseadas, realiza las acciones de control necesarias para que se consiga alcanzar la posición en la que  $s = s_d$ . Una revisión histórica de este tipo de sistemas se muestra en el Apartado 2.2.1.

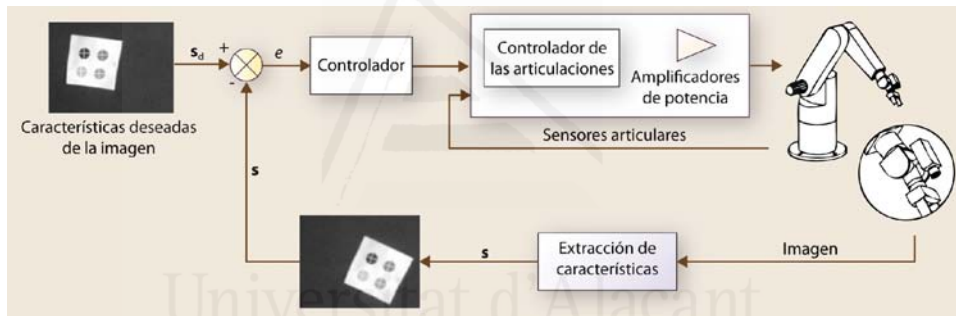


Fig. 2-10 “Ver y mover” dinámico basado en imagen

- *Control visual directo basado en imagen* (Fig. 2-11). De nuevo se observa cómo la función de error de entrada al controlador,  $e$ , es seleccionada para conseguir que las características observadas sean igual a las deseadas. Al utilizar un control visual directo el regulador se encargará asimismo de realizar la estabilización del robot.

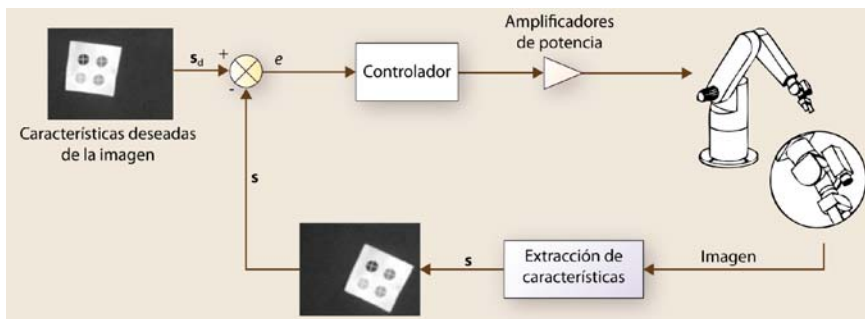









































Fig. 2-11 Control visual directo basado en imagen

La Tabla 2-2 resume las investigaciones realizadas por los grupos de investigación españoles en relación con el control visual basado en imagen. Se observa una mayor cantidad de publicaciones en comparación con la investigación realizada en control

visual basado en posición (ver [Tabla 2-1](#)). De nuevo se remite a [\[GarciaGJ-2009b\]](#) para ampliar la información presentada en la siguiente tabla.

Tabla 2-2 Resumen de la investigación española en control visual basado en imagen

Leyenda del tipo de configuración	 Par estéreo	 Cámara simulada	 Cámara panorámica
	 Eye-in-hand	 Eye-to-hand	
Referencia	Configuración	Técnica / Aplicación	
<a href="#">[Cervera-1999b]</a> <a href="#">[Cervera-2003b]</a>	 	Control visual estéreo basado en imagen	
<a href="#">[Cervera-2001a]</a> <a href="#">[Cervera-2001b]</a>	 	Control visual estéreo basado en imagen	
<a href="#">[Cervera-2002a]</a>		Simulador de control visual en Matlab/Simulink	
<a href="#">[Cervera-2002b]</a>	 	Control visual estéreo basado en imagen con características de disparidad	
<a href="#">[Ortiz-2002]</a>		Seguimiento de una línea con un estimador basado en el filtro de Kalman aplicado a un submarino autónomo para tareas de inspección de cables bajo el agua	
<a href="#">[Pomares-2002]</a>		Control visual basado en imagen con estimador del movimiento del objeto aplicado a persecución automática de coches en un juego de slot	
<a href="#">[Cervera-2003a]</a>	 	Control basado en imagen estéreo con puntos 2-D y orientación del eje principal como características	
<a href="#">[Pomares-2003]</a>		Control visual basado en imagen con estimador del movimiento del objeto para tareas de inserción de una barra en un agujero en movimiento	
<a href="#">[Pages-2004]</a> <a href="#">[Pages-2005a]</a> <a href="#">[Pages-2005b]</a>		Control visual basado en imagen con características externas basadas en luz estructurada para tareas de posicionamiento plano-a-plano	
<a href="#">[Pomares-2004a]</a> <a href="#">[Pomares-2005c]</a>		Sistema de seguimiento intemporal de trayectorias en la imagen basado en flujo de movimiento	
<a href="#">[Recatala-2004]</a>	 	Control visual estéreo basado en imagen usando los puntos de agarre como características	
<a href="#">[Cervera-2005]</a> <a href="#">[Cervera-2006]</a>	 	Arquitectura abierta de control visual donde desarrollar fácilmente sistemas de control visual basado en imagen	
<a href="#">[GarciaN-2005a]</a> <a href="#">[GarciaN-2005b]</a> <a href="#">[PerezC-2006b]</a>		Control visual basado en imagen resolviendo el problema de la visibilidad	

[Vargas-2005]		Control visual basado en imagen basado en la descomposición de la homografía
[LopezG-2006]		Control visual basado en imagen con epipolos como características visuales para el guiado automático de robots móviles
[Mejias-2006b] [Mejias-2007] [Campoy-2008]		Control visual basado en imagen para el control de vehículos aéreos automáticos (UAV)
[Merino-2006]		Estimador de movimiento a partir de múltiples homografías 2D para el control de vehículos aéreos automáticos (UAV)
[Pari-2006] [Pari-2008] [Sebastian-2009]		Control visual basado en imagen a partir de la estimación on-line de la matriz de interacción usando las propiedades de la geometría epipolar
[Pomares-2006b]		Control visual basado en imagen para el seguimiento de trayectorias con estimador del movimiento del objeto
[Echegoyen-2007]		Control visual basado en imagen del robot Aibo con cálculo de la matriz de interacción analítica. Seguimiento de la pelota en partidos de la RoboCup
[GarciaGJ-2007c] [GarciaGJ-2009d]		Sistema de seguimiento de trayectorias en la imagen basado en control visual virtual aplicado a una tarea de reemplazo de bombilla en farolas
[LopezG-2007]		Control visual switch basado en homografía para el guiado de robots móviles
[PerezC-2007]		Control visual basado en imagen con estimador del movimiento del objeto
[Pomares-2007a]		Control visual basado en imagen con calibración on-line de la cámara
[Becerra-2008]		Control visual de robots móviles basado en imagen con epipolos. Resolución de las singularidades debidas al desacople de la matriz del sistema
[Cervera-2008]		Control visual basado en imagen con cámaras panorámicas para tareas de seguridad para un brazo robótico que se mueve cerca de humanos
[LopezG-2008]		Control visual de robots móviles basado en imagen con epipolos. Ley de control switch para tratar con las restricciones de movimiento de la plataforma
[PerezC-2009]		Control visual basado en imagen con estimador del movimiento del objeto aplicado al seguimiento de un objeto situado en una mesa giratoria



En el Apartado 2.2 se presentan más en detalle los sistemas de control basados en imagen. Se describirá la implementación utilizando una arquitectura de tipo “ver y mover” dinámico, indicando sus características y consideraciones necesarias para su desarrollo.

## 2.2 Control visual basado en imagen

Frente al control basado en posición, el basado en imagen es más apropiado cuando no se dispone de un modelo geométrico de la tarea a desarrollar. Para determinar la ley de control en esta aproximación se utilizan las características del objeto en el sensor visual sin calcular su localización real, con lo que será más robusta frente a errores de calibración.

Control visual basado en imagen es una manera de guiado de robots donde la ley de control es expresada en términos de características en las imágenes, es decir, se minimiza el error entre las características de la imagen medidas y las deseadas. De esta manera, un sistema de control visual basado en imagen implica la determinación de una función de error,  $e$ , que valdrá cero cuando la tarea se haya desarrollado correctamente y haya llegado a su fin. En este momento las características observadas en la imagen,  $s$ , se corresponderán con las características deseadas  $s_d$ . En este caso la acción de control es calculada en el espacio 2-D de la imagen; por esta razón, a esta aproximación también se le denomina control visual 2-D (o su equivalente en inglés “2-D visual servoing”).

En una aplicación típica de control visual en la que el robot debe posicionarse a una distancia respecto a un objeto del espacio de trabajo, el robot describirá una determinada trayectoria a lo largo de la cual las imágenes captadas por el sistema de visión se irán modificando progresivamente. Es el controlador el que se encargará de ejecutar las acciones oportunas sobre el robot de forma que las características observadas en las imágenes se vayan aproximando progresivamente a las deseadas, es decir, a la entrada de referencia del bucle de control.

En la Fig. 2-10 y la Fig. 2-11 se presentaron, respectivamente, los bucles “ver y mover” dinámico y control visual directo para los sistemas de control basados en imagen. Sin embargo, será la estrategia “ver y mover” dinámica la que se desarrolle en este apartado.

Las características de imagen usadas para el control visual suelen tratarse de formas geométricas elementales (como pueden ser puntos característicos o esquinas) y van a permitir reconocer en una imagen la proyección de un objeto. Imágenes típicas captadas por un sistema de control basado en imagen serían las que se muestran en la Fig. 2-12.(a) y en la Fig. 2-12.(b).

La imagen de la Fig. 2-12.(a) es captada por un sistema de cámara externa fija. En esta figura se observa la presencia de la pinza del robot que se acerca al agarre de una pieza. La extracción de características sobre la Fig. 2-12.(a) permitirá realimentar al sistema y la diferencia entre estas características y las deseadas será la función de error que el controlador deberá anular progresivamente.

Por otro lado, en la Fig. 2-12.(b) se muestra una imagen obtenida con una cámara colocada en el extremo del robot. En esta imagen se han mostrado las posiciones de las

características actuales (1,2,3,4) y las deseadas (1',2',3',4'). La diferencia entre la posición de ambas características será el error,  $e$ , que deberá ir reduciendo progresivamente el sistema de control. Así, las acciones de control del regulador harán que el robot se mueva con el objetivo de que las características observadas en la imagen se vayan acercando progresivamente a las deseadas, de forma que una vez que la función de error se anule (se igualan las características deseadas y observadas) se supondrá que la tarea ha finalizado.

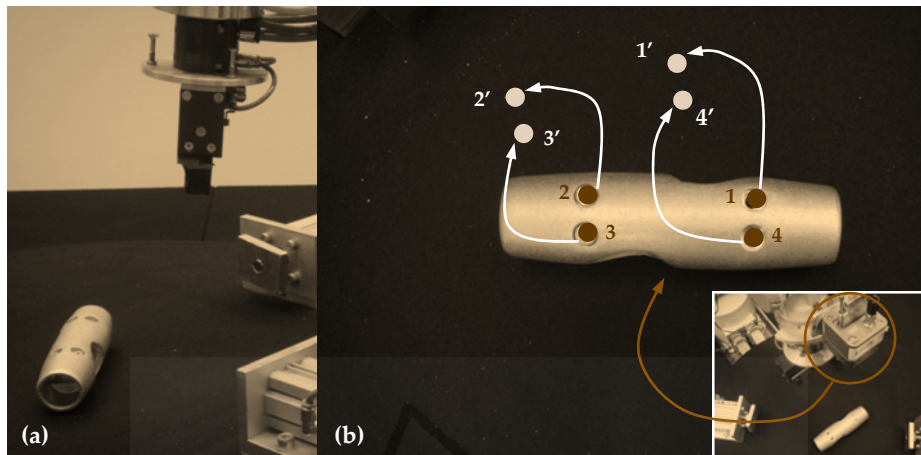


Fig. 2-12 (a) Imagen captada con cámara externa al robot. (b) Imagen captada con cámara en el extremo del robot

Los objetos son a menudo simplificados al máximo para realizar el control basado en imagen. Para la extracción de características se suelen utilizar técnicas como el marcado de puntos característicos en el objeto sobre un fondo uniforme. El tratamiento de la imagen se limita entonces a realizar una detección de estas características y el cálculo del centro de gravedad de éstos con el fin de determinar el centro de cada una de las características.

### 2.2.1 Estado del arte en control visual indirecto basado en imagen

En este apartado se muestran las principales líneas de investigación actual dentro del control visual indirecto basado en imagen. Se muestra con mayor detalle el estado del arte dentro de este campo del control visual debido a que será aquí donde se enmarcan las principales aportaciones de la investigación realizada.

Una de las primeras líneas de investigación abiertas dentro de este campo fue la desarrollada por Chaumette en su tesis doctoral [Chaumette-1990] consistente en la aplicación de la función de la tarea [Samson-1991] al caso de la información captada por una cámara. A partir de entonces han surgido un gran número de autores interesados en distintos aspectos del control visual basado en imagen. A continuación se citarán las principales líneas de investigación surgidas desde entonces.

Un aspecto importante en la configuración inicial del sistema de control visual es la calibración de la posición relativa entre cámara y extremo del robot. Esta posición relativa entre los dos sistemas de referencias permitirá transformar velocidades de la cámara a velocidades del extremo del robot que permitan ejecutar satisfactoriamente la tarea de control visual. De esta forma, el problema del control visual se centra en el cálculo de la velocidad de la cámara para minimizar el error en imagen. Para resolver

el problema de la transformación entre cámara y extremo del robot se utilizan cuaternios [TsaiRY-1987, Zhuang-1994, Fassi-2005] o teorías de la matriz de movimiento helicoidal [ZhaoZJ-2009]. Otros trabajos tratan de resolver la ecuación que relaciona los dos sistemas de referencia con algoritmos de descomposición lineal en los que primero se realiza una descomposición de valor singular, para posteriormente estimar la ecuación de mínimos cuadrados que resuelva la matriz de rotación de la transformación entre los sistemas de referencia de la cámara y el extremo del robot [Liang-2008].

Centrando las investigaciones en la problemática del control visual en sí, muchos autores se han interesado en las distintas maneras de calcular la matriz de interacción, así como determinar el comportamiento del sistema ante simplificaciones o mejoras en su cálculo. La matriz de interacción permite relacionar las variaciones de las características visuales en imagen con la velocidad de la cámara (en el Apartado 2.2.2 se describirá con mayor detalle). Así, cabe destacar el cálculo de la matriz de interacción de forma analítica como propone Chaumette en su tesis doctoral [Chaumette-1990]. Un problema que subyace ante la necesidad del cálculo de esta matriz es la necesidad de determinar en cada momento la profundidad o distancia cámara-objeto. También el cálculo de la matriz de interacción analítica requiere del conocimiento preciso de los parámetros intrínsecos de la cámara. Estos parámetros intrínsecos se pueden calcular offline, pero un cálculo online permite obtener mayor precisión, dado que factores como el calentamiento de las cámaras reales en funcionamiento hace variar estos parámetros. Es por ello que una línea de investigación reciente trata de estimar online el valor de la matriz de interacción [Sebastián-2009, Zeng-2009].

Para determinar el valor de la distancia entre la cámara y el objeto, se han desarrollado trabajos en los que se estima la profundidad a partir de conocimiento previo [Dornaika-1995], sin conocimiento previo [Jagersand-1997, De Luca-2008] o empleando redes neuronales [Suh-1993]. Dentro de este último campo se puede reseñar los estudios de Hosoda y Jagersand [Hosoda-1995, Jagersand-1997]. Otros trabajos, como los descritos en [GarciaGJ-2004, Xie-2009] obtienen la profundidad online a partir de los valores de medida de un sensor láser de distancias. En la actualidad, la mayoría de las implementaciones emplean una simplificación de esta matriz consistente en determinar su valor en el equilibrio para evitar el cálculo de la profundidad online. Otros autores, sin embargo, tratan de obtener una matriz de interacción independiente de la distancia entre la cámara y el objeto. Así, en [LiuYH-2006] se desarrolla esta matriz de interacción independiente de la distancia para el caso de puntos con cámara en configuración "eye-to-hand", mientras que en [Wang-2008] se extiende a líneas en configuración de cámara en el extremo. La matriz de interacción independiente de la distancia permite además obtener un calibrado online, ya que los parámetros intrínsecos aparecen de forma lineal en la dinámica del bucle de control.

Relacionados con los trabajos anteriores se encuentran los estudios realizados por distintos autores relativos a los problemas de singularidad, robustez y estabilidad en los sistemas de control visual basados en imagen [Nematollahi-2009]. Chaumette en [Chaumette-1998b] desarrolla un estudio acerca de la estabilidad y convergencia de estos sistemas indicando distintas situaciones que pueden provocar mínimos locales. En [Chaumette-2006], se hace una revisión de estos problemas de estabilidad. Para evitar estos problemas de singularidad y mínimos locales se han desarrollado trabajos

como [Marchand-1996] en el que se propone la inclusión de tareas secundarias dentro de la propia función de tarea para garantizar la convergencia.

Algunos de los problemas observados en las investigaciones citadas anteriormente se pueden solucionar con un nuevo tipo de control visual, denominado control visual 2-D1/2, desarrollado por Malis [Malis-1999] que se encuentra a mitad de camino entre el control basado en posición y el basado en imagen. Este nuevo método permite evitar distintas desventajas aparecidas tanto en los sistemas de control visual basados en imagen como la existente en los basados en posición. Básicamente consiste en el cálculo en cada iteración de la homografía entre las características actuales y deseadas. A partir de la homografía, se obtiene la rotación de la cámara, las características en la imagen y su profundidad relativa. Esta información es utilizada para generar una ley de control que permite asegurar la convergencia aunque la distancia al objeto sea grande (garantiza la convergencia aunque las características deseadas se encuentren lejanas a las actuales). Por otro lado, no requiere un conocimiento geométrico 3-D exhaustivo del entorno como en el caso del control visual basado en posición. Una importante línea de investigación abierta por Malis [Malis-2003b] son los sistemas de control visual no calibrados e invariantes a errores en los parámetros intrínsecos de la cámara, presentando, por ejemplo, un correcto comportamiento ante errores en la determinación del valor de la focal de la cámara utilizada. El problema del uso de la homografía es el cálculo de la distancia entre la cámara y el plano de referencia. Para calcular esta constante, Chen propone el uso de técnicas adaptativas [Chen-2005]. El control visual basado en homografías descrito en [Benhimane-2007] tiene el inconveniente de que sólo se puede aplicar a objetos planos.

Con el objetivo de evitar los problemas de convergencia citados anteriormente cabe reseñar asimismo los trabajos de Corke y Hutchinson [Corke-2001] relativos a control visual particionado. En estos trabajos se propone una estrategia de control que trata de forma separada distintos grados de libertad de la tarea para garantizar la convergencia ante distintas situaciones [Xie-2009].

También es posible combinar diferentes características 2-D y 3-D. En [Cervera-2003a, Cervera-2003b] se utiliza esta técnica para obtener la matriz de interacción, multiplicando a las coordenadas homogéneas del conjunto de características en la imagen el valor de la distancia entre la cámara y cada característica. En [Schramm-2004] se demuestra que esta selección de características no converge hacia mínimos locales.

Otra línea de investigación dentro de los sistemas de control visual basados en imagen es su aplicación a la visión activa para imponer movimientos que permitan conservar ciertas propiedades con el entorno. Dentro de este campo se enmarcan los trabajos de Marchand [Marchand-1996] que se emplean para la reconstrucción de escenas estáticas. Cabe citar también los estudios encaminados a solucionar los problemas relacionados con la navegación por control visual, dentro de los cuales se encuentran trabajos como [Pavlidis-1996, Janabi-Sharifi-1997, Blanc-2005]. En algunas ocasiones se ha resuelto el problema de navegación mediante el encadenamiento de tareas de control visual [Marchand-1996, Martinet-1999].

Otro campo de trabajo actual es el del control visual robusto [Kragic-2002, Kragic-2003]. Son reseñables los trabajos desarrollados por la misma autora en cuanto a se-

guimiento de objetos, sistemas de manipulación basados en control visual o utilización de distintos tipos de características visuales y su posterior fusión. Mansard amplía el concepto de controlador basado en la función de tarea para tener en cuenta restricciones unilaterales como los límites de las articulaciones del manipulador [Mansard-2009].

Los sistemas de visión artificial han ido mejorando su tiempo de adquisición y procesamiento de las imágenes. Sin embargo, un ámbito de investigación en control visual ha tratado de lograr una estimación de la imagen que se obtendría entre dos muestras proporcionadas por un sistema lento de adquisición de imágenes [Angel-2005, PerezC-2009]. Los retrasos en la adquisición de nuevas imágenes empeoran el comportamiento del control visual ya que las entradas al controlador se retrasan.

En diversos trabajos como [Corke-2001, Mezouar-2002a, Chesi-2005, Schramm-2006, Wang-2009] se muestra la necesidad de mantener en el campo de visión de la cámara las características del objeto implicado en el control visual. Para mantener durante la tarea estas características en la imagen se suelen emplear técnicas consistentes en la generación de un potencial en los límites de la imagen que genere una fuerza de repulsión sobre las características. Recientemente se han desarrollado sistemas de control visual utilizando cámaras panorámicas, que incrementan la posibilidad de mantener el objeto en el campo de visión de la cámara [Mariottini-2006, ZhangY-2007, Hadj-Abdelkader-2008, Mariottini-2008, Cervera-2008, Tahri-2009].

Otra técnica para resolver el problema anterior es la consistente en planificar una trayectoria en la imagen para que, de esta forma, se evite que el objeto se salga en algún momento de la tarea del campo de visión de la cámara [Mezouar-2002a, Mezouar-2003, Schramm-2006]. Estos estudios introducen una ley de control dependiente del tiempo para el seguimiento de trayectorias generadas en el espacio imagen que permitan cumplir determinadas restricciones como la evitación de configuraciones singulares o mantener las características en la imagen durante la trayectoria. Schramm muestra una aproximación en la que se mantienen las características en el campo de visión de la cámara mientras se sigue una trayectoria sin necesidad de calibrar previamente la cámara [Schramm-2006]. Mezouar trata el problema de la planificación de trayectorias como un problema de cálculo de variaciones que se puede resolver con un método numérico [Mezouar-2009]. Chesi basa la planificación de las trayectorias en condiciones de positividad sobre formas homogéneas [Chesi-2009]. Estas condiciones de positividad permiten imponer restricciones 3-D como los límites de las articulaciones del manipulador o el mantenimiento de las características en el campo de visión de la cámara. Finalmente, un método de optimización basado en desigualdades de matrices lineales permite obtener el comportamiento deseado en 3-D, ya sea una línea recta entre posiciones inicial y final o simplemente mantener un margen de visibilidad del objeto durante la tarea.

Otro aspecto que caracteriza a los sistemas de control visual basados en imagen es que se puede especificar la posición final del robot respecto a un objeto del entorno, sin embargo, no es posible definir la trayectoria que describirá el robot desde la localización inicial a la final en el espacio 3-D. Sin embargo, en la mayoría de las aplicaciones es necesario, no solo alcanzar una determinada posición, sino también hacerlo de una manera dada que cumpla determinadas restricciones en el espacio 3-D. Se observa, por lo tanto, una importante carencia de los sistemas de control visual clásicos basados en



imagen y que constituirá una aportación de esta investigación. Hasta ahora, los sistemas para el seguimiento de trayectorias que hacen uso de control visual se basan en una sucesión en el tiempo de características deseadas en la imagen u objetivos intermedios a alcanzar que, como se desarrollará en el Capítulo 3, no garantiza el correcto seguimiento de una trayectoria (ni en el espacio imagen ni en el espacio 3-D), presentando importantes problemas de estabilidad. Pomares define en su Tesis un nuevo sistema de seguimiento de trayectorias que resuelve el problema de las referencias temporales [Pomares-2004a]. Sin embargo, y tal como se detallará en el Capítulo 3, el método propuesto presenta problemas de precisión al aumentar la velocidad de seguimiento. Además, el método descrito en [Pomares-2004a] no permite definir una velocidad de seguimiento determinada. Con el objetivo de solucionar estos problemas se ha desarrollado un nuevo método de seguimiento intemporal de trayectorias en la imagen basado en control visual virtual.

### 2.2.1.1 Características extraídas en control visual

De forma general se puede afirmar que una característica en la imagen es una estructura, compuesta de píxeles, que se encuentran en un contexto lógico y que puede ser medida y extraída de la imagen. A menudo una característica en la imagen se corresponde con una característica física del objeto, por ejemplo, una línea en la imagen se corresponde con una arista del objeto físico. La selección de buenas características es crucial para el desempeño de un sistema de control visual. Una característica utilizable para realizar control visual será aquella que puede ser localizada de manera no ambigua en diferentes vistas de la escena. Otros criterios que se deben considerar en la selección de características son robustez, unicidad, controlabilidad y sensibilidad. Un parámetro de característica en la imagen se trata de un valor cuantificable que puede ser determinado a partir de una o más características en la imagen. La naturaleza de estos parámetros puede ser geométrica (p. ej. posición, superficie de un área, longitud, distancia, etc.) o fotométrica (p. ej. color, intensidad de píxel, etc.). Algunos ejemplos de parámetros de características utilizados en control visual son:

- *Principales características geométricas.* En [Chaumette-1990] se realiza un estudio detallado acerca de las distintas consideraciones para obtener una ley de control adecuada cuando las características extraídas en la imagen son puntos, líneas, segmentos, círculos, elipses, esferas, etc. Obviamente el sistema de visión artificial debe ser capaz de extraer los parámetros adecuados de la primitiva geométrica seleccionada para posteriormente aplicar el Jacobiano de la imagen adecuado. A lo largo de esta Tesis se supondrá el conocimiento de las coordenadas de ciertos puntos en la imagen, por lo tanto, la primitiva seleccionada será el punto. Estas coordenadas pueden ser obtenidas previa detección de esquinas, o lo que es más común, determinar el centroide de los objetos presentes en la imagen. El centroide o centro de gravedad de un objeto es una característica muy utilizada y se define como el punto más representativo del objeto en la imagen, permitiendo tener una aproximación de la localización del objeto en la imagen. Normalmente se utiliza el espacio cartesiano para representar la posición de una característica en la imagen. Sin embargo, Iwatsuki [Iwatsuki-2005] propone el sistema de coordenadas cilíndrico para mejorar el comportamiento del control visual.

- *Patrones de intensidad.* Consiste en detectar la localización de un determinado patrón de intensidad a lo largo de una secuencia de imágenes. Como ejemplo de este tipo de información empleada en control visual cabe mencionar trabajos como [Cretual-1998] que se utilizan principalmente para el seguimiento de objetos complejos o de los que no es posible extraer una característica determinada durante toda la tarea.
- *Snakes* [Hollinghurst-1994, Colombo-1999, Abolmaesumi-2002, Perrin-2003]. Se tratan de contornos activos que se mueven y deforman de acuerdo a varias “fuerzas”, y que tienden a adaptarse al objeto seguido. Dichas “fuerzas” están compuestas típicamente por fuerzas externas que son propiedades locales de la imagen, y fuerzas internas que son funciones de la propia forma del snake. Usualmente, un snake es atraído al máximo cuanto mayor es el gradiente en la imagen y así es utilizado para seguir contornos de un objeto en movimiento.
- *Contornos.* Cabe reseñar algún trabajo como [Collewet-2000, Pressigout-2005] que hacen uso de la información relativa al contorno de un determinado objeto presente en la imagen para realizar el guiado de robots.
- *Momentos en la imagen.* Existen investigaciones actuales [Chaumette-2002, Chaumette-2004, GarciaGJ-2005, Tahri-2005, Mebarki-2008] relativas a la utilización de distintos momentos en la imagen.
- *Combinación de distintas características.* Cuando de una determinada escena puede extraerse más de una característica, existen trabajos como [Kragic-2001] encaminados a obtener una acción de control más robusta obteniendo una información visual más fiable que en el caso de la utilización de una única característica.
- *Información del modelo 3-D del objeto.* La utilización de información procedente de un modelo del objeto a seguir permite al sistema de control visual ser más robusto. El sistema permitiría, por ejemplo, seguir con la tarea ante oclusiones del objeto [Marchand-2005]. El trabajo realizado por Collewet [Collewet-2004] permite reconstruir este modelo 3-D sin información previa. En [Fioravanti-2009] se propone el uso de dos circunferencias coaxiales y un punto para modelar el objeto.
- *Esferas.* En [Tatsambon-2007, Tatsambon-2008, Tatsambon-2009] se propone el uso de esferas para realizar el control visual usando un modelo de proyección esférica.

A la hora de seleccionar o hacer uso de características es necesario considerar problemas como la posible oclusión de dichas características [Pomares-2004a]. La oclusión es un problema típico que surge en tiempo de ejecución y que puede ser parcialmente evitado utilizando características en la imagen redundantes [GarciaN-2005b, GarciaN-2005c]. Este tipo de problemas también se pueden evitar utilizando sistemas inteligentes con la habilidad de almacenar la desaparición de una característica y la estimación de la localización actual [Pomares-2006b]. Otro problema que puede surgir en sistemas de control visual es la aparición de singularidades visuales. Una configuración de un

robot encuentra una singularidad visual cuando un movimiento dado en el robot no produce cambios en las características de la imagen.

Como ya se ha comentado anteriormente, en los sistemas de control basados en imagen el bucle de control es realimentado con las características extraídas de las imágenes, sin necesidad de determinar la localización del objetivo a alcanzar. Esto va a suponer una ventaja frente a los basados en posición ya que, además de hacer al sistema menos sensible a errores de calibración, se van a reducir tiempos de procesamiento.

Para realizar este tipo de control, el sistema de cámaras utilizado puede ser de cámara externa al robot o un sistema de cámara situada en el extremo del mismo. A continuación se va a describir cómo desarrollar la regulación proporcional necesaria para la reducción del error,  $e$ , en un sistema de cámara fija externa al robot. Para ello se va a utilizar el concepto de matriz de interacción o Jacobiano de la imagen descrito por primera vez por Sanderson et al. [Sanderson-1980].

### 2.2.2 Matriz de interacción

Para comprender la utilidad de la matriz de interacción supóngase que se dispone de un sistema de cámara fija que observa el movimiento del extremo de un robot. A partir de las imágenes capturadas, el sistema de visión es capaz de extraer un punto característico,  $p_E^C$ , situado en el extremo del robot.

En un instante de tiempo, el punto  $p_E^C$  situado en el extremo del robot se moverá con una velocidad de rotación  $w_E^C (\dot{\alpha}_E^C, \dot{\beta}_E^C, \dot{\gamma}_E^C)$ , así como también, una velocidad de traslación  $v_{tE}^C (\dot{x}_{tE}^C, \dot{y}_{tE}^C, \dot{z}_{tE}^C)$ , ambas con respecto al sistema de coordenadas de la cámara.

A su vez, el sistema de visión captará la evolución temporal de esta característica,  $f$ , en el plano de la imagen  $(\dot{f}_x, \dot{f}_y)$ .

La matriz de interacción,  $L_f$ , es una expresión en forma de matriz que relaciona las velocidades de las características en el plano de la imagen con las velocidades (de traslación y rotación) relativas de los puntos correspondientes a las características, con respecto al sistema de coordenadas de la cámara. De esta forma se puede conocer cómo cambian las características en el plano de la imagen cuando se produce un cambio en el extremo del robot en movimiento:

$$\begin{bmatrix} \dot{f}_x \\ \dot{f}_y \end{bmatrix} = L_f(p_E^C) \cdot \begin{bmatrix} v_{tE}^C \\ w_E^C \end{bmatrix}. \quad (2.1)$$

En un caso general, considerando  $p^C$  la posición de un punto de un objeto observado por la cámara en un espacio de dimensión  $j$ ,  $v^C = [v_t^C \quad w^C]$  será su velocidad respecto al sistema de referencia de la cámara (compuesta por velocidad de traslación y rotación). Se va a representar con  $s$  un vector de  $i$  características observadas en la imagen (medidas en píxeles), mientras que  $\dot{s}$  será el flujo óptico o variación de estas carac-



terísticas en la imagen. La matriz de interacción o Jacobiano de la imagen se representará como  $\mathbf{L}_s$  y realizará la siguiente transformación:

$$\dot{\mathbf{s}} = \mathbf{L}_s \cdot \mathbf{v}^C. \quad (2.2)$$

Desarrollando la expresión anterior, se obtiene la expresión que permite calcular esta matriz de interacción:

$$\dot{\mathbf{s}} = \frac{\partial \mathbf{s}}{\partial \mathbf{r}} \cdot \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \mathbf{t}}, \dot{\mathbf{s}} = \begin{bmatrix} \dot{f}_{1x} \\ \dot{f}_{1y} \\ \vdots \\ \dot{f}_{ix} \\ \dot{f}_{iy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_{1x}}{\partial \mathbf{r}_1} & \dots & \frac{\partial f_{1x}}{\partial \mathbf{r}_j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_{iy}}{\partial \mathbf{r}_1} & \dots & \frac{\partial f_{iy}}{\partial \mathbf{r}_j} \end{bmatrix} \cdot \mathbf{v}^C. \quad (2.3)$$

Como se observa en la expresión (2.3), el número de columnas en la matriz de interacción variará dependiendo de la tarea (se ha considerado un espacio de dimensión  $j$ ). En general la matriz tendrá  $i$  filas y  $j$  columnas y no se puede asegurar que sea cuadrada.

A continuación se va a determinar de forma teórica el valor de la matriz de interacción. Para ello se parte del modelo de cámara pin-hole. Sea un punto  $\mathbf{p}^M$  de la escena 3-D en coordenadas del mundo  $\mathbf{p}^M(x_p^M, y_p^M, z_p^M)$  y sea  $\mathbf{p}^S(x_p^S, y_p^S)$  su proyección en el plano imagen; la proyección  $\mathbf{p}^S$  en el plano imagen del punto  $\mathbf{p}^M$  se obtiene como intersección de la línea que une  $\mathbf{p}^M$  y el centro óptico de la cámara  $C$  con el plano imagen. La distancia entre el centro óptico  $C$  y el plano imagen se denomina distancia focal o simplemente focal,  $f$ . Al punto que se obtiene como intersección del eje principal  $z_c$  (línea perpendicular al plano imagen que pasa por el centro óptico  $C$ ), y al plano imagen se le llama punto principal (Fig. 2-13).

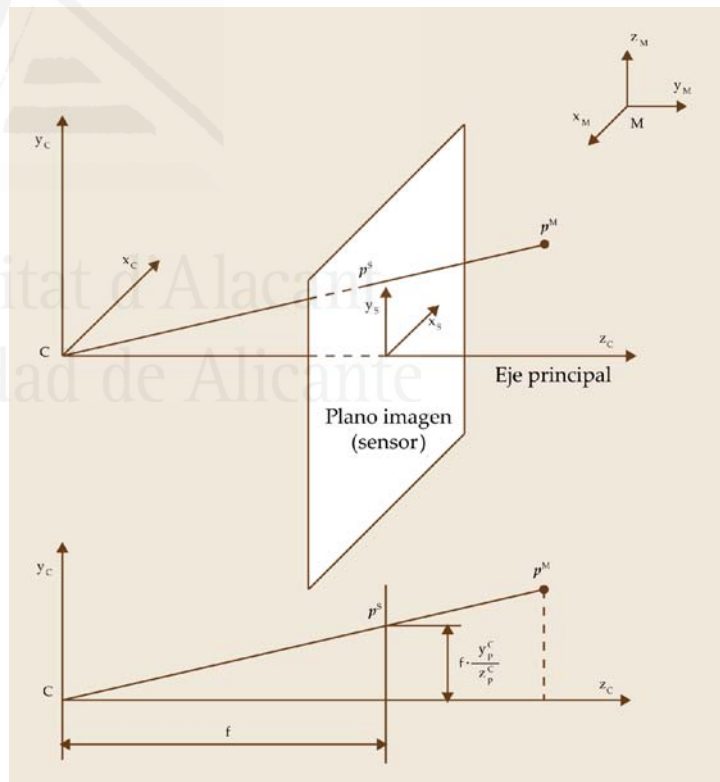


Fig. 2-13 Principales sistemas de coordenadas en el modelo pin-hole

Este punto principal  $(u_0, v_0)$  representa dos de los parámetros intrínsecos de la cámara. Para obtenerlos se debe calibrar la cámara, ya sea en una fase previa o mediante una calibración online. La focal,  $f$ , es otro de los parámetros intrínsecos que se deben considerar a la hora de modelar una cámara real. Como se acaba de describir, es la distancia entre el sistema de referencia de la cámara y el plano imagen. Normalmente, la distancia focal se suele agrupar con otros dos parámetros que representan el tamaño del

píxel:  $(s_x, s_y)$ . Así, los parámetros intrínsecos de la cámara se suelen modelar mediante el conjunto  $\xi = \{f_u, f_v, u_0, v_0\}$ , siendo  $f_u = f \cdot s_x$  y  $f_v = f \cdot s_y$

En el modelo de cámara pinhole, el sistema de lentes de la cámara es aproximado por un único punto. Con esta aproximación la imagen siempre se encuentra enfocada sin importar la distancia entre el objeto y las lentes o la distancia entre las lentes y el plano imagen. De esta manera, cuando se utiliza el modelo pinhole un punto en el sistema de coordenadas 3-D de la cámara,  $C$ , se proyecta en un punto en el sistema de coordenadas 2-D del sensor,  $S$ , de la siguiente manera:

$$p^S = \frac{f}{z^C} \cdot p^C. \quad (2.4)$$

donde  $f$  es la focal de la cámara.

Si se tiene que realizar la transformación previa entre el sistema de referencia del mundo y el sistema de referencia de la cámara, se hará uso de los parámetros extrínsecos de la cámara. Estos parámetros relacionan el sistema de referencia de la cámara (que puede ser fijo o no), con un sistema de referencia fijo en la escena. El paso de un sistema de referencia a otro se realiza multiplicando por la matriz de parámetros extrínsecos, que almacenan la traslación y rotación entre los dos sistemas. En el caso que estamos desarrollando, la transformación sería la siguiente para obtener las coordenadas del punto en el sistema de referencia de la cámara:

$$p^C = M_M^C \cdot p^M. \quad (2.5)$$

El último paso para obtener las coordenadas en píxeles del punto 3-D observado por la cámara se realiza a partir del resto de parámetros intrínsecos descritos (recorremos que hasta ahora sólo se ha utilizado la focal para convertir las coordenadas desde el sistema de referencia de la cámara al sistema de referencia 2-D del plano imagen):

$$f = \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_0 \\ v_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} s_x & 0 \\ 0 & s_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p^S \\ y_p^S \end{bmatrix}. \quad (2.6)$$

Substituyendo el valor de la Ecuación (2.4) en (2.6) se obtiene el valor de la característica visual en píxeles en función del punto 3-D correspondiente expresado en el sistema de referencia de la cámara:

$$f = \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_0 \\ v_0 \end{bmatrix} + \frac{1}{z_p^C} \begin{bmatrix} f \cdot s_x & 0 \\ 0 & f \cdot s_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p^C \\ y_p^C \end{bmatrix}. \quad (2.7)$$

Considerando un conjunto de características,  $s$ , formado por un único punto,  $f$ , (es decir,  $s = \{f\}$ ) se va a desarrollar la Ecuación (2.3) con el objetivo de obtener la matriz de interacción para puntos. Derivando con respecto al tiempo la expresión anterior, se obtiene:

$$\dot{s} = \dot{f} = \begin{bmatrix} \dot{f}_x \\ \dot{f}_y \end{bmatrix} = -\frac{\dot{z}_p^C}{(z_p^C)^2} \begin{bmatrix} f_u & 0 \\ 0 & f_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p^C \\ y_p^C \end{bmatrix} + \frac{1}{z_p^C} \begin{bmatrix} f_u & 0 \\ 0 & f_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_p^C \\ \dot{y}_p^C \end{bmatrix}. \quad (2.8)$$

Considerando una cámara en movimiento y un objeto fijo, la ecuación fundamental de la cinemática toma el siguiente valor:

$$v^c = w^c \times p^c + v_t^c. \quad (2.9)$$

Desarrollando la expresión anterior:

$$v^c = \begin{bmatrix} \dot{x}_p^c \\ \dot{y}_p^c \\ \dot{z}_p^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\alpha}^c \\ \dot{\beta}^c \\ \dot{\gamma}^c \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_p^c \\ y_p^c \\ z_p^c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{x}_t^c \\ \dot{y}_t^c \\ \dot{z}_t^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -y_p^c \dot{\gamma}^c + z_p^c \dot{\beta}^c + \dot{x}_t^c \\ -z_p^c \dot{\alpha}^c + x_p^c \dot{\gamma}^c + \dot{y}_t^c \\ -x_p^c \dot{\beta}^c + y_p^c \dot{\alpha}^c + \dot{z}_t^c \end{bmatrix}. \quad (2.10)$$

Sustituyendo los valores obtenidos en la Ecuación (2.10) en la expresión (2.8), se obtiene:

$$\dot{s} = -\frac{-x_p^c \dot{\beta}^c + y_p^c \dot{\alpha}^c + \dot{z}_t^c}{(z_p^c)^2} \begin{bmatrix} f_u & 0 \\ 0 & f_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p^c \\ y_p^c \end{bmatrix} + \frac{1}{z_p^c} \begin{bmatrix} f_u & 0 \\ 0 & f_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -y_p^c \dot{\gamma}^c + z_p^c \dot{\beta}^c + \dot{x}_t^c \\ -z_p^c \dot{\alpha}^c + x_p^c \dot{\gamma}^c + \dot{y}_t^c \end{bmatrix}. \quad (2.11)$$

Desarrollando la expresión anterior:

$$\dot{s} = \begin{bmatrix} -\frac{f_u x_p^c}{(z_p^c)^2} (-x_p^c \dot{\beta}^c + y_p^c \dot{\alpha}^c + \dot{z}_t^c) + \frac{f_u}{z_p^c} (-y_p^c \dot{\gamma}^c + z_p^c \dot{\beta}^c + \dot{x}_t^c) \\ -\frac{f_v y_p^c}{(z_p^c)^2} (-x_p^c \dot{\beta}^c + y_p^c \dot{\alpha}^c + \dot{z}_t^c) + \frac{f_v}{z_p^c} (-z_p^c \dot{\alpha}^c + x_p^c \dot{\gamma}^c + \dot{y}_t^c) \end{bmatrix}. \quad (2.12)$$

Agrupando términos se puede conseguir obtener la variación de las características en la imagen en función de la velocidad de traslación y rotación de la cámara:

$$\dot{s} = \begin{bmatrix} \frac{f_u}{z_p^c} \dot{x}_t^c + 0 \dot{y}_t^c - \frac{f_u x_p^c}{(z_p^c)^2} \dot{z}_t^c - \frac{f_u x_p^c y_p^c}{(z_p^c)^2} \dot{\alpha}^c + \left( \frac{f_u (x_p^c)^2}{(z_p^c)^2} + f_u \right) \dot{\beta}^c - \frac{f_u y_p^c}{z_p^c} \dot{\gamma}^c \\ 0 \dot{x}_t^c + \frac{f_v}{z_p^c} \dot{y}_t^c - \frac{f_v y_p^c}{(z_p^c)^2} \dot{z}_t^c + \left( -\frac{f_v (y_p^c)^2}{(z_p^c)^2} - f_v \right) \dot{\alpha}^c + \frac{f_v x_p^c y_p^c}{(z_p^c)^2} \dot{\beta}^c + \frac{f_v x_p^c}{z_p^c} \dot{\gamma}^c \end{bmatrix}. \quad (2.13)$$

A partir de la Ecuación (2.7) se puede obtener el valor de las coordenadas  $x_p^c$  e  $y_p^c$  del punto 3-D en función de sus coordenadas en el plano imagen expresadas en píxeles:

$$\begin{bmatrix} x_p^c \\ y_p^c \end{bmatrix} = z_p^c \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ f_u & 1 \\ 0 & f_v \end{bmatrix} \left( \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u_0 \\ v_0 \end{bmatrix} \right). \quad (2.14)$$

Substituyendo estos valores en la Ecuación (2.12) se obtiene:

$$\dot{\mathbf{s}} = \begin{bmatrix} \frac{f_u}{z_p^c} \dot{x}_t^c + 0\dot{y}_t^c - \frac{(f_x - u_0)}{z_p^c} \dot{z}_t^c - \frac{(f_x - u_0)(f_y - v_0)}{f_v} \dot{\alpha}^c + \frac{(f_x - u_0)^2 + f_u^2}{f_u} \dot{\beta}^c - \frac{f_u(f_y - v_0)}{f_v} \dot{\gamma}^c \\ 0\dot{x}_t^c + \frac{f_v}{z_p^c} \dot{y}_t^c - \frac{(f_y - v_0)}{z_p^c} \dot{z}_t^c - \frac{(f_y - v_0)^2 + f_v^2}{f_v} \dot{\alpha}^c + \frac{(f_x - u_0)(f_y - v_0)}{f_u} \dot{\beta}^c + \frac{f_v(f_x - u_0)}{f_u} \dot{\gamma}^c \end{bmatrix}. \quad (2.15)$$

Con lo que se obtiene la siguiente relación en la que se observa el valor de la matriz de interacción:

$$\dot{\mathbf{s}} = \begin{bmatrix} \frac{f_u}{z_p^c} & 0 & -\frac{(f_x - u_0)}{z_p^c} & -\frac{(f_x - u_0)(f_y - v_0)}{f_v} & \frac{(f_x - u_0)^2 + f_u^2}{f_u} & -\frac{f_u(f_y - v_0)}{f_v} \\ 0 & \frac{f_v}{z_p^c} & -\frac{(f_y - v_0)}{z_p^c} & -\frac{(f_y - v_0)^2 + f_v^2}{f_v} & \frac{(f_x - u_0)(f_y - v_0)}{f_u} & \frac{f_v(f_x - u_0)}{f_u} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{x}_t^c \\ \dot{y}_t^c \\ \dot{z}_t^c \\ \dot{\alpha}^c \\ \dot{\beta}^c \\ \dot{\gamma}^c \end{bmatrix}. \quad (2.16)$$

Supóngase ahora el caso en el que el sistema de visión es capaz de extraer  $n$  puntos característicos de la imagen. En este caso, el conjunto de características está formado por varios puntos de la imagen expresados en píxeles,  $\mathbf{s} = \{f_i, i \in 1..n\}$ , y la matriz de interacción obtenida se puede generalizar para varios puntos de la siguiente manera:

$$\mathbf{L}_s = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{f_1} \\ \mathbf{L}_{f_2} \\ \vdots \\ \mathbf{L}_{f_n} \end{bmatrix}. \quad (2.17)$$

Las dimensiones de la matriz de interacción serán  $i \times j$  siendo  $i/2$  el número de características observadas en la imagen y  $j$  los grados de libertad de la tarea.

Como se ha procedido para puntos, puede obtenerse la matriz de interacción para el caso que se desee realizar el seguimiento de elipses. Considerando que se extraen el centro  $(X_c, Y_c, z_c)$  y los momentos de orden dos,  $\mu_{20}, \mu_{02}, \mu_{11}$  podrá obtenerse la matriz de interacción de la siguiente manera:

$$\mathbf{L}_m = [\mathbf{L}_{X_c} \quad \mathbf{L}_{Y_c} \quad \mathbf{L}_{\mu_{20}} \quad \mathbf{L}_{\mu_{02}} \quad \mathbf{L}_{\mu_{11}}]^T, \quad (2.18)$$

$$\mathbf{L}_{X_c} = \begin{bmatrix} -1 & X_c & X_c Y_c + \mu_{11} & -1 - X_c^2 - \mu_{20} & Y_c \\ z_c & z_c & z_c & z_c & z_c \end{bmatrix}, \quad (2.19)$$

$$\mathbf{L}_{Y_c} = \begin{bmatrix} -1 & Y_c & 1 + Y_c^2 + \mu_{02} & -X_c Y_c - \mu_{11} & -X_c \\ z_c & z_c & z_c & z_c & z_c \end{bmatrix}, \quad (2.20)$$

$$\mathbf{L}_{\mu_{20}} = \begin{bmatrix} -2(a\mu_{20} + b\mu_{11}) & 0 & 2[(1/z_c + aX_c)\mu_{20} + bX_c\mu_{11}] & 2(Y_c\mu_{20} + X_c\mu_{02}) & -4\mu_{20}X_c & 2\mu_{11} \end{bmatrix}, \quad (2.21)$$

$$\mathbf{L}_{\mu_{02}} = \begin{bmatrix} 0 & -2(a\mu_{11} - b\mu_{02}) & 2[(1/z_c + bY_c)\mu_{02} + aY_c\mu_{11}] & 4Y_c\mu_{02} & -2(Y_c\mu_{11} + X_c\mu_{02}) & -2\mu_{11} \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

$$\mathbf{L}_{\mu_{11}}^T = \begin{bmatrix} -a\mu_{11} - b\mu_{02} \\ -a\mu_{20} - b\mu_{11} \\ aY_c\mu_{20} + \left(\frac{3}{z_c} - c\right)\mu_{11} + bX_c\mu_{02} \\ 3Y_c\mu_{11} + X_c\mu_{02} \\ -Y_c\mu_{20} - 3X_c\mu_{11} \\ \mu_{02} - \mu_{20} \end{bmatrix}, \quad (2.23)$$

donde:

$$\begin{aligned} a &= \frac{n_x}{n_x c_x + n_y c_y + n_z c_z}, \\ b &= \frac{n_y}{n_x c_x + n_y c_y + n_z c_z}, \\ c &= \frac{n_z}{n_x c_x + n_y c_y + n_z c_z}, \end{aligned} \quad (2.24)$$

y  $\mathbf{n}=(n_x, n_y, n_z)$  es la normal al plano formado por la elipse.

En general, la matriz de interacción es función de:

- Constantes calculadas a partir del proceso de calibración de la cámara.
- El valor actual de las características extraídas en la imagen.
- De información 3-D relativa a los puntos correspondientes a las características en la imagen (p. ej. la distancia de la cámara a la característica del objeto correspondiente).

Una cuestión no trivial es la de determinar la forma de actualizar la matriz de interacción en el bucle de control debido a las dependencias mostradas anteriormente. Es posible distinguir dos casos dependiendo si la actualización se realiza en línea o a priori:

- *Actualización a priori de la matriz de interacción.* En este caso, la matriz de interacción es calculada una única vez antes de comenzar la tarea de control visual. El valor de las características en la imagen de las que depende la matriz de interacción son consideradas iguales a las características deseadas, por lo tanto la distancia de la cámara al objeto será la deseada y consecuentemente la que se obtendría una vez finalizada la tarea. Esta aproximación disminuye la cantidad de cálculos a realizar durante el desarrollo de la tarea de control visual preservando la convergencia [Marchand-1996].
- *Actualización en línea de la matriz de interacción.* En este caso la matriz de interacción es recalculada en cada iteración en función de las características extraídas de la

imagen. Como se observa en la Ecuación (2.16), la matriz de interacción depende del valor  $z_E^C$ , que es la distancia de la cámara a la característica del objeto correspondiente, o en este caso al extremo del robot. Atendiendo a la forma de actualizar este valor se pueden encontrar las siguientes implementaciones:

- Extracción del valor  $z_E^C$  en cada iteración. Este caso se corresponde al cálculo más completo posible e implica la estimación, en cada iteración del bucle, de la profundidad del objeto (o del extremo del robot) respecto a la cámara [Dornaika-1995]. Si se dispone de un sistema de cámara fija, una manera obvia de determinar la profundidad es utilizando un par estereoscópico. En determinadas aplicaciones se parte de disponer previamente de una calibración que permita determinar en cada iteración el valor de esta distancia. Se puede utilizar otro tipo de sensor (aparte del visual), como pueden ser ultrasonidos, láser, etc.
- Aproximación del valor  $z_E^C$  al que se desea que se encuentre el robot una vez finalizada la tarea. En este caso se realiza la aproximación de que el objeto se encuentra situado a una distancia constante a la cámara. Esta aproximación es más eficiente computacionalmente; sin embargo, no se asegura la convergencia, en particular si la posición inicial de las características en la imagen se encuentran alejadas de su localización deseada [Chaumette-1997], siendo únicamente válido en una pequeña región del espacio.
- Cálculo mediante métodos de optimización que utilizan la regla de actualización de Broyden dada por [Hosoda-1994, Jagersand-1997]. Este método se ha generalizado al caso de objetos en movimiento en [Piepmeier-2004].

Malis [Malis-2004a] fusiona los dos primeros métodos descritos de actualización en línea de la matriz de interacción para conseguir mejorar la respuesta del control visual, mejorando la oscilación de las velocidades y obteniendo una trayectoria más suave en la imagen y en 3-D. Sequeira et al. [Sequeira-2004] utiliza un modelo fuzzy de la matriz de interacción para controlar directamente el robot sin necesidad de calcular en cada iteración el Jacobiano de la imagen. Otra técnica de estimación online de la matriz de interacción se desarrolla también en [Sebastián-2009].

### 2.2.3 Controlador utilizando la matriz de interacción

Se va a suponer que el objetivo de una tarea particular va a ser alcanzar un conjunto de características en la imagen que se van a representar con un vector de características deseadas  $\mathbf{s}_d$ . En un instante de tiempo determinado, las características observadas en la imagen son  $\mathbf{s}$ . El regulador seleccionado debe ser tal que aplique sobre el robot las acciones oportunas de manera que los valores de  $\mathbf{s}$  se vayan acercando progresivamente a los de  $\mathbf{s}_d$ .

Haciendo uso de la aproximación de la función de tarea propuesta por Samson [Samson-1991], una tarea de control visual se puede expresar como una regulación a cero de la siguiente función de tarea:

$$e(\mathbf{r}, t) = \hat{\mathbf{L}}_s^+ (\mathbf{s}(\mathbf{r}, t) - \mathbf{s}_d), \quad (2.25)$$

donde se observa que tanto el error,  $e$ , como las características observadas en la cámara  $\mathbf{s}$  dependen de la localización de la cámara respecto al sistema de coordenadas del mundo,  $\mathbf{r}$ , y del tiempo,  $t$ . Además, de lo visto a lo largo de este capítulo se puede deducir que  $e_s(\mathbf{r}, t) = \mathbf{s}(\mathbf{r}, t) - \mathbf{s}_d$ .

Con  $\hat{\mathbf{L}}_s$  se representa una estimación de la matriz de interacción ya que, como se comentó anteriormente, depende de la distancia de la cámara al objeto seguido, y en muchas ocasiones se considera esta matriz constante igual a la correspondiente a la posición final deseada.

Como se observa, en la Ecuación (2.25) se ha empleado la pseudoinversa de la matriz de interacción que posteriormente también será utilizada para expresar la acción de control en forma de velocidad de traslación y rotación del extremo del robot en función del error expresado en términos de características en la imagen.

En la Expresión (2.25) se podría haber utilizado la inversa bajo la suposición de que la matriz de interacción sea cuadrada ( $i=j$ ), no singular y por tanto exista la inversa. Para que ocurra esto el número de características extraídas en la imagen debe ser 3, con lo que el Jacobiano de la imagen será de  $6 \times 6$ .

Si se observan  $i/2$  características en la imagen de manera que  $i > j$ , se utiliza la siguiente pseudoinversa:

$$\mathbf{L}_s^+ = (\mathbf{L}_s^T \cdot \mathbf{L}_s)^{-1} \cdot \mathbf{L}_s^T. \quad (2.26)$$

En el caso de que  $i < j$ , el sistema no observa suficientes características para determinar de manera unívoca el movimiento del objeto.

En este caso la matriz pseudoinversa utilizada tiene el siguiente valor:

$$\mathbf{L}_s^+ = \mathbf{L}_s^T \cdot (\mathbf{L}_s \cdot \mathbf{L}_s^T)^{-1}. \quad (2.27)$$

Se desea que la función de tarea decrezca de manera exponencial, de forma que se cumpla:

$$\dot{e} = -\lambda \cdot e. \quad (2.28)$$

siendo  $\lambda > 0$ . Por otro lado, como  $e$  es función de la localización de la cámara,  $\mathbf{r}$ , y del tiempo,  $t$ , su derivada se puede expresar de la siguiente manera:

$$\dot{e} = \left( \frac{\partial e}{\partial \mathbf{r}} \right) \mathbf{v}^c + \frac{\partial e}{\partial t}, \quad (2.29)$$

donde  $\mathbf{v}^c$  es la velocidad de la cámara, y  $\frac{\partial e}{\partial t}$  representa las variaciones en el error debidas al movimiento del objeto. Por otro lado, a partir de la definición de la función de tarea se puede afirmar que  $\frac{\partial e}{\partial \mathbf{r}}$  viene dado por:



$$\frac{\partial e}{\partial r} = \hat{\mathbf{L}}_s^+ \mathbf{L}_s. \quad (2.30)$$

A partir de las Ecuaciones (2.28) y (2.29) es posible obtener la siguiente expresión para la velocidad de la cámara:

$$v^c = \left( \frac{\partial \hat{e}}{\partial r} \right)^+ \left( -\lambda e - \frac{\partial \hat{e}}{\partial t} \right), \quad (2.31)$$

donde:

- $\left( \frac{\partial \hat{e}}{\partial r} \right)^+$  puede ser igualado a la matriz identidad ya que:

$$\frac{\partial \hat{e}}{\partial r} = \hat{\mathbf{L}}_s^+ \hat{\mathbf{L}}_s = \mathbf{I}_6, \quad (2.32)$$

- $\frac{\partial \hat{e}}{\partial t}$  es una estimación del movimiento del objeto en la imagen. Si este término no es correctamente estimado se obtendrán errores en las tareas de seguimiento de un objeto en movimiento [Pomares-2006b].

#### 2.2.4 Estabilidad en el sentido de Lyapunov

Existen muchos métodos para estudiar la estabilidad de los sistemas lineales y/o invariantes en el tiempo. El concepto de estabilidad en estos sistemas es inmediato y representa el concepto de cuánta sensibilidad tiene el sistema ante errores en la estimación de los parámetros o ante perturbaciones externas. Los sistemas no lineales variantes en el tiempo, sin embargo, no presentan un concepto tan directo y sencillo de estabilidad [Khalil-2002]. La estabilidad en estos sistemas se define de diversas formas en la literatura, coincidiendo en su mayoría en la definición de estabilidad sobre ciertos conjuntos del sistema, como los puntos de equilibrio. El concepto más extendido sobre la estabilidad de un sistema dinámico es el propuesto por Lyapunov en su Tesis doctoral [Lyapunov-1892]. En su teoría sobre la estabilidad de los sistemas dinámicos introduce una de las principales distinciones en la estabilidad de los sistemas lineales y los no lineales. Se trata del carácter local de la estabilidad de los sistemas no lineales. La teoría de Lyapunov sobre la estabilidad de los sistemas no lineales se puede resumir en la búsqueda de la estabilidad del sistema dinámico en los puntos de equilibrio del sistema. Básicamente, si todas las soluciones del sistema dinámico que empieza cerca de un punto de equilibrio  $x_e$  permanecen cerca de  $x_e$  para siempre, entonces el sistema es estable en el sentido de Lyapunov. Pero Lyapunov va un paso más allá al definir la estabilidad asintótica de un sistema lineal. Es un concepto más restrictivo de estabilidad, ya que indica que si todas las soluciones que empiezan cerca de  $x_e$  convergen hacia  $x_e$ , el sistema será asintóticamente estable. Aplicando el concepto al sistema de control visual, se trata de demostrar que el sistema es asintóticamente estable, toda vez que lo que pretende el sistema es llevar la cámara a la posición final en la que las características finales en imagen se correspondan con las características mostradas por la cámara.

Un sistema de control visual es un sistema dinámico que tiene por entradas las imágenes adquiridas por la cámara y como salida la posición de la cámara en el espacio Cartesiano 3D. En un sistema de control visual basado en imagen clásico, el punto de equilibrio es el punto final de la cámara, donde no existirá velocidad, ya que la posición de las características en la imagen coincide con la posición de las características deseadas.

En la Fig. 2-14 se resumen los distintos conceptos de estabilidad definidos por Lyapunov.

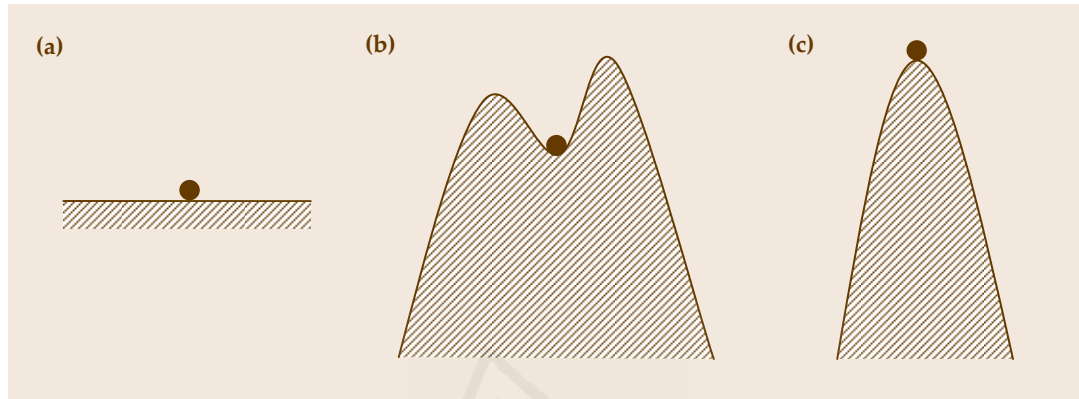


Fig. 2-14 (a) Sistema estable (b) Sistema asintóticamente estable (c) Sistema inestable

La idea de estabilidad que presenta Lyapunov se asemeja a una bola situada en los puntos de equilibrio mostrados en la Fig. 2-14. El primer caso representado por la Fig. 2-14.(a), cualquier pequeña perturbación que se le haga a la bola respecto a su posición inicial de equilibrio mantendrá a la bola cerca de esta posición de equilibrio, pero sin tender a recuperar la posición de equilibrio inicial. Este concepto es el de estabilidad propiamente dicha. El segundo caso mostrado en la Fig. 2-14.(b) se corresponde con la estabilidad asintótica. Cualquier pequeño movimiento que se le haga a la bola en un sentido o en otro de la posición inicial de equilibrio llevará a la bola siempre a la posición inicial. Es decir, la bola converge hacia la posición de equilibrio ante pequeñas perturbaciones. Por último, el tercer caso muestra un sistema inestable (Fig. 2-14.(c)). Cualquier movimiento, por pequeño que sea, hará que la bola se aleje de la posición de equilibrio.

La estabilidad asintótica en el sentido de Lyapunov se puede definir como global o como local. La diferencia está en el grado de la perturbación respecto al punto de equilibrio que se permite para mantener la estabilidad. Así, si ante una perturbación muy grande (posición inicial muy alejada de la posición de equilibrio) el sistema mantiene las características de estabilidad se dirá que el sistema cumple la estabilidad global, mientras que si la estabilidad se cumple sólo en un entorno pequeño del punto de equilibrio se puede hablar únicamente de estabilidad local.

De la teoría clásica de la Mecánica, es sabido que un sistema es estable si su energía, una función positiva, es continuamente decreciente, o sea tiene derivada negativa, hasta que el sistema alcanza su estado de equilibrio [Ogata-2001]. El método directo de Lyapunov es una generalización de este hecho. Lyapunov demostró que ciertas otras funciones aparte de la función energía pueden ser usadas para la determinación de la estabilidad del punto de equilibrio de un sistema. Una función de Lyapunov es

una función definida positiva cuya derivada es definida negativa. Encontrar una función de Lyapunov para un sistema no lineal en particular es una tarea difícil. Es importante anotar que la condición de estabilidad mediante las funciones de Lyapunov no son condiciones suficientes. Es decir, el hecho de no encontrar una función de Lyapunov para un sistema en concreto no implica que el sistema sea inestable. Sin embargo, encontrar una función de Lyapunov permitirá demostrar la estabilidad de un sistema. A continuación se presenta el estudio de la estabilidad asintótica global del control visual basado en imagen. Sin embargo, tal como se verá en el desarrollo del siguiente apartado, la estabilidad asintótica global no se puede demostrar para el control visual basado en imagen, por lo que se estudiará la estabilidad asintótica local.

#### 2.2.4.1 Análisis de la estabilidad asintótica global por Lyapunov

Se considera la función candidata de Lyapunov definida por el cuadrado del módulo del error:

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2} \|e(t)\|^2. \quad (2.33)$$

Su derivada con respecto al tiempo es:

$$\dot{\mathcal{L}} = e^T \dot{e}. \quad (2.34)$$

La variación del error respecto al tiempo viene relacionada con la velocidad de la cámara mediante la matriz de interacción  $\mathbf{L}_s$ :

$$\dot{e} = \mathbf{L}_s v_c, \quad (2.35)$$

substituyendo  $v_c$  de la ley de control visual basado en imagen:

$$v_c = -\lambda \hat{\mathbf{L}}_s^+ e, \quad (2.36)$$

se obtiene que la derivada de la función candidata de Lyapunov es:

$$\dot{\mathcal{L}} = -\lambda e^T \mathbf{L}_s \hat{\mathbf{L}}_s^+ e. \quad (2.37)$$

Para que la derivada de la función candidata de Lyapunov sea definida negativa, y de esta forma obtener la estabilidad asintótica global del sistema, se debe asegurar la siguiente condición:

$$\mathbf{L}_s \hat{\mathbf{L}}_s^+ > 0. \quad (2.38)$$

Si la matriz  $\mathbf{L}_s \hat{\mathbf{L}}_s^+$  se demuestra que es definida positiva, por la definición de estas matrices, se asegurará que  $e^T \mathbf{L}_s \hat{\mathbf{L}}_s^+ e > 0$  para todo  $e$ . Esta demostración es imposible si se tienen matrices rectangulares. Ahora bien, si el número de características es igual al número de grados de libertad de la cámara ( $k = 6$ ), y tanto la elección de las características como el diseño del esquema de control se realizan de forma que  $\mathbf{L}_s$  y  $\hat{\mathbf{L}}_s^+$  sean de rango 6, entonces la condición anterior se asegura si las aproximaciones realizadas en  $\hat{\mathbf{L}}_s^+$  no presentan demasiado error.

Sin embargo, para la mayoría de las aproximaciones de control visual basado en imagen, se tiene  $k > 6$ . De esta forma, la condición (2.38) nunca se podrá asegurar ya que  $\mathbf{L}_s \hat{\mathbf{L}}_s^+ \in \mathbb{R}^{k \times k}$  es como mucho de rango 6; con lo que  $\mathbf{L}_s \hat{\mathbf{L}}_s^+$  tiene un espacio nulo no trivial. En este caso configuraciones en las que  $\mathbf{e} \in \text{Ker} \mathbf{L}_s \hat{\mathbf{L}}_s^+$  se corresponden con mínimos locales. Por lo que se puede concluir que en el control visual basado en imagen sólo se podrá obtener una estabilidad asintótica local.

#### 2.2.4.2 Análisis de la estabilidad asintótica local por Lyapunov

Para estudiar la estabilidad asintótica local cuando  $k > 6$ , se define primero un nuevo error  $\mathbf{e}'$ :

$$\mathbf{e}' = \hat{\mathbf{L}}_s^+ \mathbf{e}. \quad (2.39)$$

La derivada respecto al tiempo de este error viene dada por:

$$\dot{\mathbf{e}}' = \hat{\mathbf{L}}_s^+ \dot{\mathbf{e}} + \dot{\hat{\mathbf{L}}}_s^+ \mathbf{e}. \quad (2.40)$$

Aplicando (2.35) y (2.36) queda para la derivada del error  $\mathbf{e}'$ :

$$\dot{\mathbf{e}}' = (\hat{\mathbf{L}}_s^+ \mathbf{L}_s + \mathbf{O}) \mathbf{v}_c, \quad (2.41)$$

donde  $\mathbf{O} = -\frac{1}{\lambda} \dot{\hat{\mathbf{L}}}_s^+ \hat{\mathbf{L}}_s^+ \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$  es igual a 0 cuando  $\mathbf{e} = 0$ , sea cual sea la elección de  $\hat{\mathbf{L}}_s^+$  [Malis-2004b]. Usando el esquema de control (2.36) en (2.39), se obtiene:

$$\dot{\mathbf{e}}' = -\lambda (\hat{\mathbf{L}}_s^+ \mathbf{L}_s + \mathbf{O}) \mathbf{e}'. \quad (2.42)$$

Que será asintóticamente estable de manera local en un entorno de  $\mathbf{e} = \mathbf{e}^* = 0$  si se cumple:

$$\hat{\mathbf{L}}_s^+ \mathbf{L}_s > 0, \quad (2.43)$$

donde  $\hat{\mathbf{L}}_s^+ \mathbf{L}_s \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ . Es más, si se está interesado en la estabilidad asintótica local, sólo se considera el sistema lineal [Isidori-1995]:

$$\dot{\mathbf{e}}' = -\lambda \hat{\mathbf{L}}_s^+ \mathbf{L}_s \mathbf{e}'. \quad (2.44)$$

De nuevo, como se vio en el intento de demostrar la estabilidad asintótica global, una aproximación no demasiado rigurosa de  $\hat{\mathbf{L}}_s^+$ , unido a una correcta elección de las características y un diseño del esquema de control que permita que  $\mathbf{L}_s$  y  $\hat{\mathbf{L}}_s^+$  sean de rango 6, permitiría asegurar la condición (2.43).

Para terminar la demostración de la estabilidad asintótica local se debe demostrar que no existe ninguna configuración  $\mathbf{e} \in \mathbf{e}^*$  tal que  $\mathbf{e} \in \text{Ker} \hat{\mathbf{L}}_s^+$  en un pequeño entorno de  $\mathbf{e}^*$  y en un pequeño entorno de la posición final correspondiente de la cámara  $\mathbf{p}^*$ . Este tipo de configuraciones se corresponde con mínimos locales donde  $\mathbf{v}_c = 0$  y  $\mathbf{e} \in \mathbf{e}^*$ . Si existiera esta posición de la cámara  $\mathbf{p}$ , sería posible restringir el entorno de  $\mathbf{p}^*$  de forma que existiera una velocidad de la cámara  $\mathbf{v}_c$  que permita llegar a  $\mathbf{p}^*$  desde  $\mathbf{p}$ . Esta velo-

cidad de la cámara implica una variación del error  $\dot{e} = L_s v_c$ . Sin embargo, esta variación no puede pertenecer al  $\text{Ker} \hat{L}_s^+$ , ya que  $\hat{L}_s^+ L_s > 0$ . De esta forma, se tiene  $v_c = 0$  si y sólo si  $\dot{e} = 0$ , es decir,  $e = e^*$ , en un entorno de  $p^*$ .

### 2.2.5 Un primer ejemplo de tarea de control visual basado en imagen

Para ilustrar lo visto en este apartado supóngase que se dispone de un sistema compuesto por una cámara localizada en el extremo de un robot y un objeto del cual se extraen cuatro características. En la Fig. 2-15 se observa la localización inicial de la cámara junto con las características extraídas, mientras que en la Fig. 2-16 se representa la localización deseada.

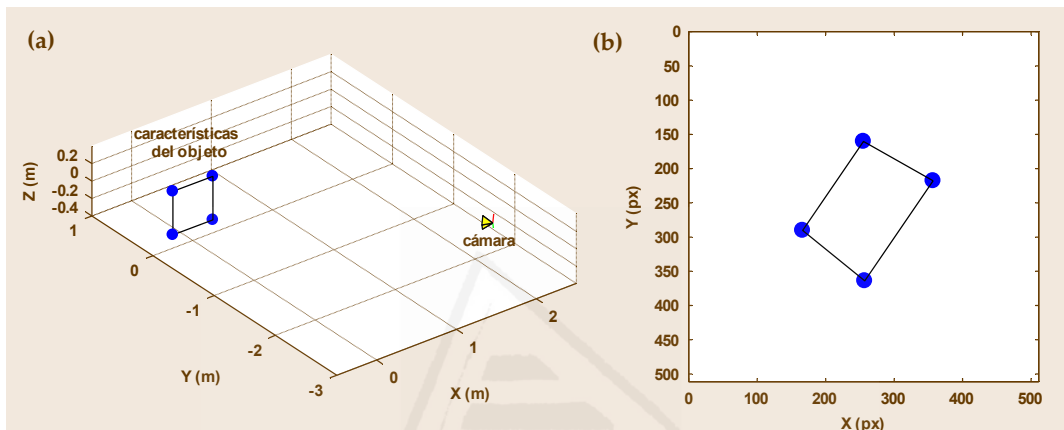


Fig. 2-15 (a) Posición inicial de la cámara. (b) Imagen obtenida por la cámara en la que se observan las características iniciales del objeto en la imagen

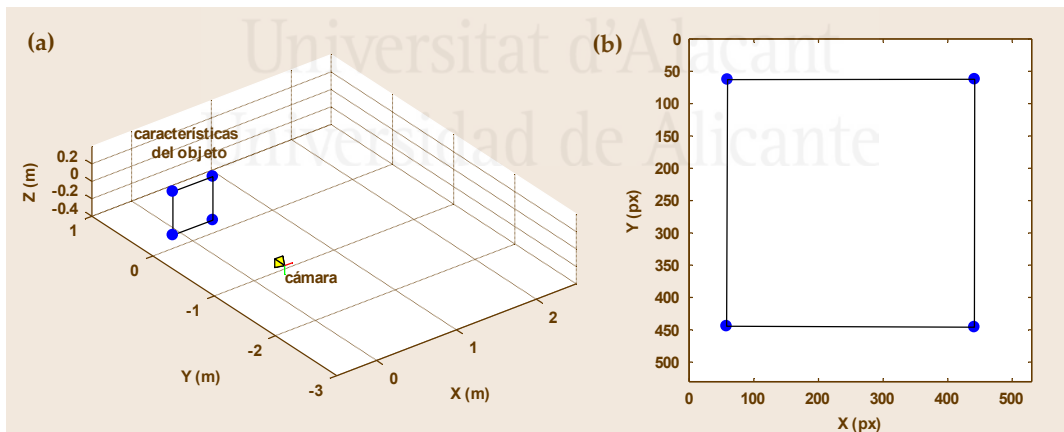


Fig. 2-16 (a) Posición deseada de la cámara. (b) Imagen obtenida por la cámara en la que se observan las características deseadas del objeto en la imagen

Bajo estas consideraciones la matriz de interacción tomará el siguiente valor (ver Ecuaciones (2.16) y (2.17)):

$$\mathbf{L}_s = \begin{bmatrix} \frac{f_u}{z_p^C} & 0 & -\frac{(f_{x1}-u_0)}{z_p^C} & -\frac{(f_{x1}-u_0)(f_{y1}-v_0)}{f_v} & \frac{(f_{x1}-u_0)^2 + f_u^2}{f_u} & -\frac{f_u(f_{y1}-v_0)}{f_v} \\ 0 & \frac{f_v}{z_p^C} & -\frac{(f_{y1}-v_0)}{z_p^C} & -\frac{(f_{y1}-v_0)^2 + f_v^2}{f_v} & \frac{(f_{x1}-u_0)(f_{y1}-v_0)}{f_u} & \frac{f_v(f_{x1}-u_0)}{f_u} \\ \frac{f_u}{z_p^C} & 0 & -\frac{(f_{x2}-u_0)}{z_p^C} & -\frac{(f_{x2}-u_0)(f_{y2}-v_0)}{f_v} & \frac{(f_{x2}-u_0)^2 + f_u^2}{f_u} & -\frac{f_u(f_{y2}-v_0)}{f_v} \\ 0 & \frac{f_v}{z_p^C} & -\frac{(f_{y2}-v_0)}{z_p^C} & -\frac{(f_{y2}-v_0)^2 + f_v^2}{f_v} & \frac{(f_{x2}-u_0)(f_{y2}-v_0)}{f_u} & \frac{f_v(f_{x2}-u_0)}{f_u} \\ \frac{f_u}{z_p^C} & 0 & -\frac{(f_{x3}-u_0)}{z_p^C} & -\frac{(f_{x3}-u_0)(f_{y3}-v_0)}{f_v} & \frac{(f_{x3}-u_0)^2 + f_u^2}{f_u} & -\frac{f_u(f_{y3}-v_0)}{f_v} \\ 0 & \frac{f_v}{z_p^C} & -\frac{(f_{y3}-v_0)}{z_p^C} & -\frac{(f_{y3}-v_0)^2 + f_v^2}{f_v} & \frac{(f_{x3}-u_0)(f_{y3}-v_0)}{f_u} & \frac{f_v(f_{x3}-u_0)}{f_u} \\ \frac{f_u}{z_p^C} & 0 & -\frac{(f_{x4}-u_0)}{z_p^C} & -\frac{(f_{x4}-u_0)(f_{y4}-v_0)}{f_v} & \frac{(f_{x4}-u_0)^2 + f_u^2}{f_u} & -\frac{f_u(f_{y4}-v_0)}{f_v} \\ 0 & \frac{f_v}{z_p^C} & -\frac{(f_{y4}-v_0)}{z_p^C} & -\frac{(f_{y4}-v_0)^2 + f_v^2}{f_v} & \frac{(f_{x4}-u_0)(f_{y4}-v_0)}{f_u} & \frac{f_v(f_{x4}-u_0)}{f_u} \end{bmatrix}.$$

(2.45)

A partir de la Ecuación (2.31) y considerando que el objeto del que se extraen las características no se encuentra en movimiento, se obtiene la siguiente ley de control:

$$\mathbf{v}^C = -\lambda \cdot \mathbf{L}_s^+ \cdot (\mathbf{s} - \mathbf{s}_d).$$

(2.46)

Por lo tanto, el sistema de control basado en imagen realizará las acciones necesarias sobre el robot para que se produzcan los cambios en las características observadas en la imagen que hagan que estas características,  $\mathbf{s}$ , alcancen el valor de las características deseadas,  $\mathbf{s}_d$ . La Fig. 2-17 muestra la evolución de las velocidades aplicadas al robot durante la tarea de control visual descrita. Para ello, se aplica la Ecuación (2.46) utilizando una ganancia de 0.125. Con esta acción de control la evolución del error de cada una de las características es la que se muestra en la Fig. 2-18.

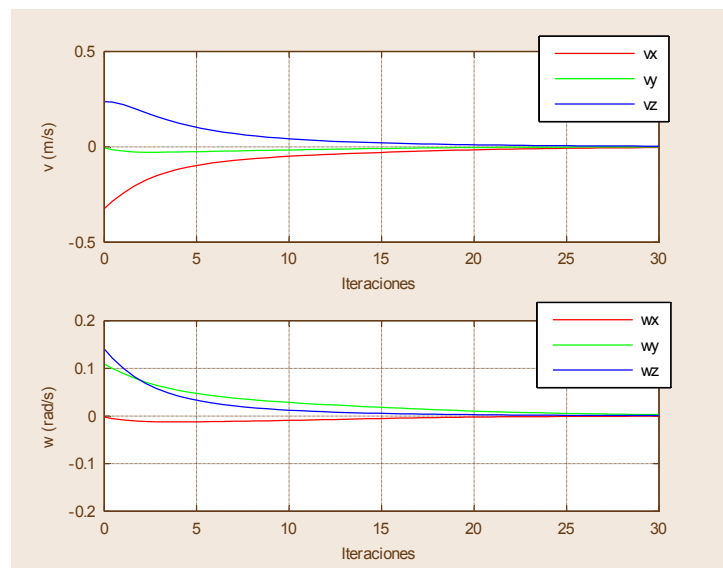


Fig. 2-17 Evolución de las velocidades lineal y angular aplicadas al robot

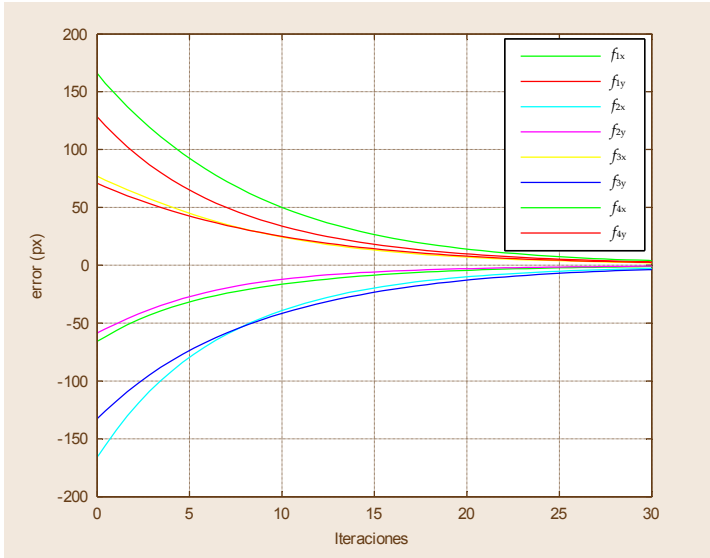


Fig. 2-18 Evolución del error de cada característica expresada en píxeles ( $f_i - f_{id}$ ), con  $i = x, y$

En la Fig. 2-19.(a) se muestra la trayectoria en el espacio cartesiano descrita por la cámara para alcanzar la posición deseada desde su posición inicial. En la Fig. 2-19.(b) se muestra la evolución, durante la trayectoria de la cámara, de las características extraídas en la imagen.

En la Fig. 2-20 se muestra la trayectoria que se obtendría para la misma tarea, pero aplicando control visual basado en posición. Se observa como la trayectoria obtenida para la cámara es recta, frente a la trayectoria obtenida empleando control visual basado en imagen

(Fig. 2-19.(a)). En este último caso se obtiene una trayectoria recta en las características extraídas en la imagen (Fig. 2-19.(b)). Como se comentó anteriormente, en muchas ocasiones cuando se emplea control visual basado en imagen se evita calcular la distancia de la cámara al objeto, considerándola como la deseada, es decir, la que se obtendrá una vez finalizada la tarea. Esta aproximación, que aligera notablemente los cálculos, provoca que se obtenga una evolución más oscilatoria de las características extraídas en la imagen (Fig. 2-21).

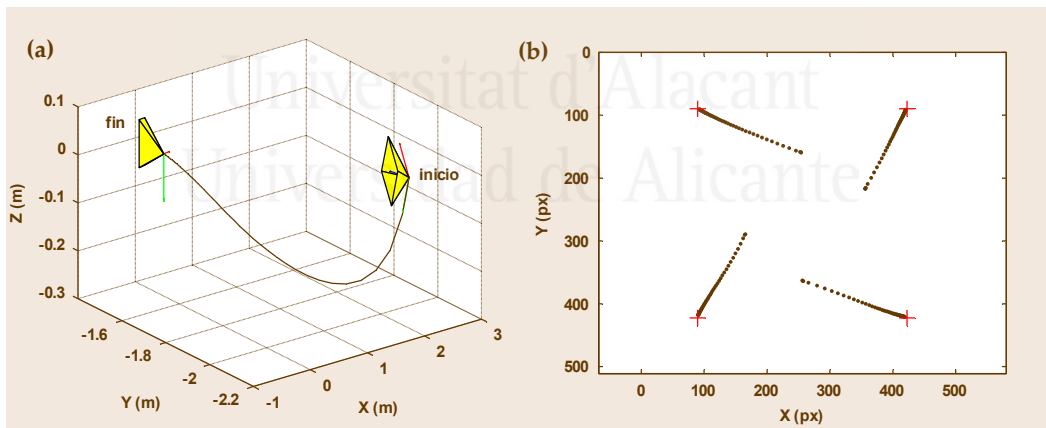


Fig. 2-19 Control visual basado en imagen: (a) Trayectoria seguida por la cámara. (b) Trayectoria de las características extraídas en la imagen

En el vídeo [video2-1.wmv](#) del DVD adjunto a esta Tesis se puede ver una tarea de control visual donde el robot sigue una cartulina con 4 marcas que el sistema selecciona como características visuales. En el vídeo [video2-2.wmv](#) se puede ver una grabación de la evolución de las características en la imagen para una tarea de posicionamiento con control visual.



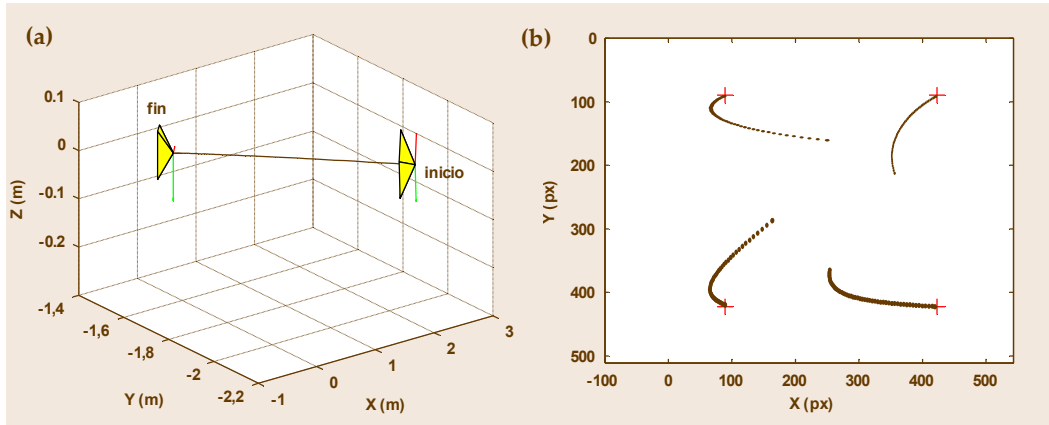


Fig. 2-20 Control visual basado en posición: (a) Trayectoria seguida por la cámara (b) Trayectoria de las características extraídas en la imagen

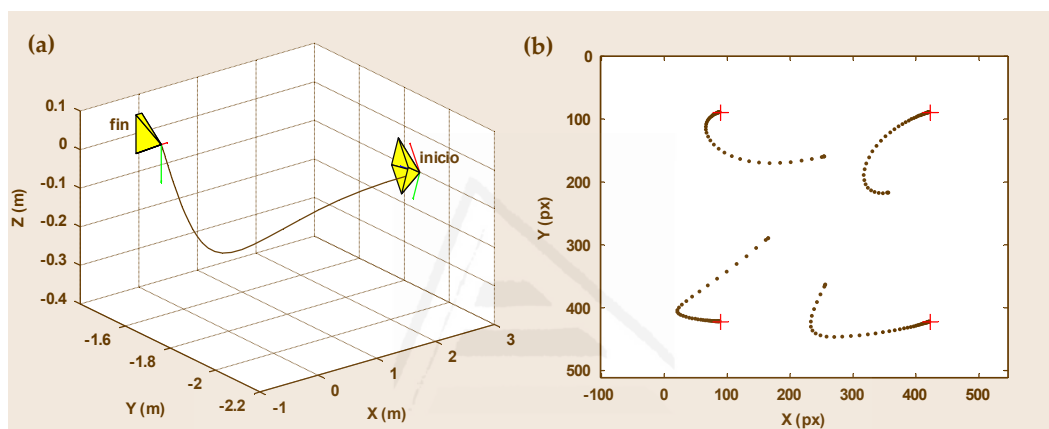


Fig. 2-21 Control visual basado en imagen considerando la distancia entre el objeto y la cámara: (a) Trayectoria seguida por la cámara (b) Trayectoria de las características extraídas en la imagen

## 2.3 Control visual virtual

### 2.3.1 Introducción

El control visual virtual es una técnica que permite obtener los parámetros extrínsecos de una cámara a partir de una imagen tomada por ésta. En el Capítulo 3 se describe un método de seguimiento intemporal de trayectorias en la imagen que hace uso de las propiedades del control visual virtual para obtener la posición de la cámara respecto del objeto que se pretende seguir.

Tradicionalmente, la calibración de la posición y orientación de la cámara respecto a los objetos situados en la escena donde se desarrolla una tarea de control visual se realiza en una fase previa. Esta calibración previa permite establecer una relación constante entre la cámara y un sistema de referencia de la escena. Así, cuando se está trabajando en una configuración "eye-in-hand", las técnicas de calibración offline de los parámetros extrínsecos de la cámara permiten conocer con precisión la relación entre la cámara y el extremo del robot. Sin embargo, resulta interesante para la ejecución de la tarea de control visual conocer en cada iteración la relación entre la cámara y el objeto

de seguimiento. Como se ha comentado en el presente capítulo, el conocimiento de información 3-D es necesario para mejorar el comportamiento del control visual basado en imagen. Es por ello que al disponer de la relación entre los sistemas de referencia de la cámara y el objeto mejorará la estabilidad del control visual.

El problema de la determinación de la localización de la cámara fue definido formalmente por Fischler y Bolles en 1981 [Fischler-1981]. A partir de aquí, los trabajos previos para obtener la posición de la cámara respecto a un objeto a partir de la proyección de éste en la imagen usan básicamente dos métodos:

- *Métodos analíticos o geométricos.* Partiendo de la base de que la cámara ha sido calibrada previamente, se puede conocer la relación entre los puntos en el espacio 3-D y su proyección en el espacio imagen. Para ello se precisa un modelo 3-D del objeto. La proyección de este modelo en la imagen con los parámetros intrínsecos obtenidos en la calibración previa permite tener una imagen con la que comparar la imagen adquirida por la cámara durante la tarea. La investigación en este campo se centra en la función que mide la semejanza entre la imagen real y la proyectada. Así, Felzenszwalb y Huttenlocher emplean programación dinámica como método para resolver el complejo problema de optimización [Felzenszwalb-2005]. En [Lee-2004] se resuelve el problema de optimización utilizando un método de Monte Carlo basado en cadenas de Markov. Lucchese propone un método analítico para estimar los parámetros extrínsecos de una cámara previamente calibrada [Lucchese-2006]. Para ello hace uso de una imagen de un objeto plano con geometría conocida, extrayendo un conjunto de puntos característicos que se rectifican a partir de una homografía 2-D. Esta matriz de homografía permite calcular los parámetros buscados. Phong et al. describen en [Phong-1993] otro método analítico para el cálculo de la localización de la cámara que utiliza correspondencias de puntos y líneas. A partir de una función de error que debe ser minimizada para averiguar la localización a partir de una imagen. La naturaleza cuadrática de esta función de error se debe a la representación de la posición y orientación mediante un cuaternio dual. Shi et al. describen el uso de esquinas como puntos característicos para establecer correspondencias [Shi-2004]. Los puntos de esquina son características fácilmente segmentables en una escena real. Sólo una esquina y un punto, que no esté situado en el vértice de la esquina en una misma imagen, son suficientes para determinar unívocamente la localización de la cámara.

La literatura en cuanto al problema de la estimación de la localización de la cámara es extensa. Se ha tratado el problema usando multitud de características visuales, como: puntos, líneas, contornos, cónicas u objetos cilíndricos. Estos métodos son robustos y precisos y presentan siempre una solución basada en algoritmos no iterativos como los requeridos en los métodos que se describen a continuación. No dependen normalmente de una inicialización previa y son aptos para aplicaciones en tiempo real. El principal inconveniente de estos métodos es que normalmente requieren un complejo proceso de extracción de características.

- *Métodos basados en aprendizaje.* Estos métodos utilizan la inteligencia artificial para obtener la relación entre posición y orientación de la cámara y la imagen actual del

objeto en la escena. Estas aproximaciones requieren el uso de una fase previa de aprendizaje. El sistema es alimentado con un conjunto lo mayor posible de parejas imagen-localización de la cámara. Los parámetros extrínsecos en un momento dado de la tarea se estiman a partir de la comparación de la imagen obtenida con la base de datos de las parejas obtenidas en la fase de aprendizaje.

Así, Lepetit et al. utilizan las imágenes capturadas por la cámara para entrenar al sistema produciendo una descripción compacta de la escena [Lepetit-2004]. Usando herramientas de clasificación estadística, el algoritmo de aprendizaje propuesto agrupa las imágenes en función de las características que describen la escena. La técnica propuesta permite reducir la tasa de error de emparejamiento al tiempo que desplaza una parte de la carga computacional desde el emparejamiento (online) a la fase de entrenamiento (offline). La forma en que se crean las imágenes que se compararán posteriormente con las imágenes obtenidas durante la ejecución de la tarea es el principal tema de investigación en los métodos de cálculo de la localización de la cámara mediante métodos basados en aprendizaje. Lepetit et al. utilizan un resumen de las imágenes capturadas en fase de aprendizaje para crear la base de datos con la que comparar en la fase de ejecución. En [Nomura-1996] Nomura et al. proponen crear imágenes a partir de un modelo CAD del objeto en distintas posiciones de la cámara. La idea es proyectar el modelo de alambres del objeto en una imagen en muchas posiciones de la cámara y posteriormente comparar esas imágenes con la imagen real para saber qué localización tiene la cámara real. Sin embargo, para hacer más robusto el emparejamiento de las imágenes, proponen generar además de las imágenes del modelo de alambres otra imagen con las sombras del objeto. El emparejamiento se realiza con un método no lineal de mínimos cuadrados. Santos et al. presentan un método geométrico iterativo para la estimación de los parámetros extrínsecos a partir de cuatro puntos coplanares [Santos-2006]. Con una estrategia “divide y vencerás” segmentan el plano imagen e intentan una reconstrucción iterativa de la localización en el espacio de la cámara por comparación del par características-localización almacenado en la base de datos. Agarwal y Triggs [Agarwal-2006] proponen un método para seleccionar características relevantes usando técnicas de regresión con máquinas de vectores de relevancia (RVMs). Las características visuales utilizadas son descriptores de forma de los puntos de silueta, y la estimación de la localización se plantea como un emparejamiento uno a uno desde el espacio de las características al de la localización. En [Thayananthan-2008] Thayananthan et al. formulan el problema de la estimación de los parámetros extrínsecos como funciones de aprendizaje de emparejamiento uno a muchos, de forma que se resuelvan los problemas de ambigüedad encontrados en [Agarwal-2006]. También resuelto como un problema de regresión que empareja características de forma con el espacio de localización, Chen et al. [Chen-2009] estiman la localización 3-D de personas en tareas de vigilancia.

Aunque las técnicas descritas permiten realizar la búsqueda sobre un conjunto reducido de la base de datos para una determinada imagen, todos los conjuntos de imágenes y localización enviados al sistema en la fase de aprendizaje deben ser almacenados. El número de patrones necesario para representar el espacio de localizaciones de la cámara depende del rango de movimientos posibles y de la

precisión requerida, y puede ser del orden de cientos y miles de parejas. Por lo tanto, aunque estas técnicas son a menudo muy rápidas, en general tienen una menor precisión en la estimación de los parámetros extrínsecos de la cámara al tiempo que son útiles únicamente para aplicaciones muy específicas.

El problema de la calibración de la cámara usando control visual virtual ya ha sido descrito en [Marchand-2001, Kinoshita-1994]. Se trata de un método analítico o geométrico de estimación de la localización de la cámara. Básicamente, el control visual virtual trata de minimizar el error entre las características observadas en la imagen y las características calculadas por retroproyección a partir de los parámetros intrínsecos y extrínsecos actuales de una cámara virtual. Estos parámetros se van modificando en cada iteración hasta que las características observadas y proyectadas coinciden. En este momento se habrán obtenido los parámetros extrínsecos e intrínsecos de la cámara real.

Son varias las razones que hacen que el control visual virtual sea la técnica idónea para calcular la localización de la cámara en tareas de control visual. Por un lado, se dispone de toda la información correspondiente a las imágenes procesadas hasta el momento por el sistema de control visual. No es necesario volver a segmentar por tanto los objetos que aparecen en la imagen en busca de las características deseadas para el control visual virtual dado que ya han sido procesados. Por otro lado, el controlador que minimizará el error en posición ya está implementado, de forma que se está reutilizando un sistema ya desarrollado, en este caso para controlar una cámara virtual. El hecho de que el control visual virtual permita calcular además de los parámetros extrínsecos de la cámara sus parámetros intrínsecos, supone que el control visual basado en imagen resuelva los problemas de mínimos locales presentes en desplazamientos largos, debidos fundamentalmente al uso de una calibración incorrecta o no precisa de la cámara.

### 2.3.2 Formulación

Esta sección describe la notación y principales consideraciones acerca de la aproximación de control visual virtual desarrollada. El control visual virtual parte de una imagen adquirida por la cámara. A partir de esta imagen, se pretende conocer la posición relativa del objeto segmentado en la imagen con respecto a la cámara. Para ello, se introduce en la escena una cámara virtual en una posición inicial estimada. Utilizando la técnica del control visual basado en imagen, se ejecuta una tarea de control visual con esta cámara virtual, de forma que las características proyectadas en la imagen usando los parámetros extrínsecos e intrínsecos de la cámara virtual vayan progresivamente acercándose a las características observadas en la imagen real. En adelante,  $s_d$  son las posiciones deseadas de las características en la imagen para el control visual virtual (es decir, las características observadas en la imagen adquirida por la cámara real) y  $s$  son las posiciones actuales de las características en la imagen (estas características son generadas a partir de los parámetros intrínsecos y extrínsecos estimados de la cámara virtual, como se describe en (2.49)).  $\xi$  representa los parámetros intrínsecos actuales (punto principal, focal) y  $M_0^c$  son los parámetros extrínsecos (posición y orientación del sistema de coordenadas del objeto con respecto al sistema de coordenadas de la cámara).

A partir del modelo de cámara pinhole descrito en la Fig. 2-13 se describirán a continuación las diferentes transformaciones que se deben realizar para obtener medidas en píxeles de un punto proyectado en la imagen de la cámara virtual. Así, el primer paso es una transformación que permita obtener las coordenadas de cualquier punto del objeto expresadas en el sistema de referencia de la cámara. Un punto del objeto,  $\mathbf{P}^O$ , se expresa en el sistema de referencia de la cámara a partir de la matriz de parámetros extrínsecos:

$$\mathbf{P}^C = (X^C, Y^C, Z^C) = \mathbf{M}_O^C \mathbf{P}^O. \quad (2.47)$$

Aplicando la proyección de perspectiva al punto,  $\mathbf{P}^C$ , expresado en el sistema de referencia de la cámara, se pueden calcular las coordenadas del punto en el plano imagen que posteriormente se transformará según el modelo de la cámara en las coordenadas en píxeles.

El punto expresado en coordenadas métricas del plano imagen se obtiene a partir de la distancia focal, tal como se describe en (2.4):

$$\mathbf{p} = (x, y)^T = \left( f \frac{X^C}{Z^C}, f \frac{Y^C}{Z^C} \right)^T. \quad (2.48)$$

La última transformación va a permitir obtener las coordenadas en píxeles del punto 2-D del objeto en el plano imagen de la cámara virtual.

$$\mathbf{s} = (f_x, f_y) = (u_0 + f_u x, v_0 + f_v y). \quad (2.49)$$

El conjunto de puntos característicos del objeto proyectado por la cámara virtual,  $\mathbf{s}$ , se forma a partir de la proyección de cada punto obtenida utilizando la proyección de perspectiva descrita en la Ecuación (2.49). Para obtener la calibración del sistema, se debe minimizar progresivamente el error entre este conjunto de características obtenido a partir de los parámetros extrínsecos e intrínsecos actuales de la cámara virtual y los datos observados por la cámara real,  $\mathbf{s}_d$ . De esta forma, el error se define como:

$$\mathbf{e} = \mathbf{s} - \mathbf{s}_d. \quad (2.50)$$

La derivada de este error respecto al tiempo será:

$$\dot{\mathbf{e}} = \dot{\mathbf{s}} - \dot{\mathbf{s}}_d = \frac{\partial \mathbf{s}}{\partial \mathbf{r}} \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \mathbf{t}} + \frac{\partial \mathbf{s}}{\partial \xi} \frac{\partial \xi}{\partial \mathbf{t}}. \quad (2.51)$$

Que se puede reescribir como:

$$\dot{\mathbf{e}} = \mathbf{H}_s \mathbf{V}, \quad (2.52)$$

donde:

$$\mathbf{V} = \begin{pmatrix} v_c \\ \xi \end{pmatrix}, \quad (2.53)$$

$$\mathbf{H}_s = \begin{pmatrix} \frac{\partial \mathbf{s}}{\partial \mathbf{r}} & \frac{\partial \mathbf{s}}{\partial \xi} \end{pmatrix}. \quad (2.54)$$

Para hacer  $e$  decrecer exponencialmente a 0 se usa, al igual que en control visual, un regulador proporcional,  $\dot{e} = -\lambda e$ , obteniéndose la siguiente acción de control:

$$\mathbf{V} = -\lambda \mathbf{H}_s^+ e. \quad (2.55)$$

En resumen, se van variando progresivamente los parámetros intrínsecos y extrínsecos, de forma que una vez que el error se anula, se obtienen los parámetros intrínsecos y extrínsecos reales de la cámara.

La nueva matriz de interacción difiere con la matriz de interacción descrita en el apartado 2.2.2 en la inclusión de información referente a la variación de los parámetros intrínsecos. Esta matriz de interacción permite obtener variaciones de las características en la imagen a partir de variaciones en los parámetros intrínsecos de la cámara y de la velocidad de ésta. Los parámetros intrínsecos considerados son el punto principal  $(u_0, v_0)$  y la relación entre la distancia focal y el tamaño del píxel  $(f_u, f_v)$ . Partiendo de la Ecuación (2.54) se puede obtener el valor de esta matriz de interacción. Así, el primer elemento de la matriz,  $\frac{\partial \mathbf{s}}{\partial \mathbf{r}}$ , se obtuvo ya en el apartado 2.2.2:

$$\frac{\partial \mathbf{s}}{\partial \mathbf{r}} = \begin{bmatrix} \frac{f_u}{z_p^c} & 0 & -\frac{(f_x - u_0)}{z_p^c} & -\frac{(f_x - u_0)(f_y - v_0)}{f_v} & \frac{(f_x - u_0)^2 + f_u^2}{f_u} & -\frac{f_u(f_y - v_0)}{f_v} \\ 0 & \frac{f_v}{z_p^c} & -\frac{(f_y - v_0)}{z_p^c} & -\frac{(f_y - v_0)^2 + f_v^2}{f_v} & \frac{(f_x - u_0)(f_y - v_0)}{f_u} & \frac{f_v(f_x - u_0)}{f_u} \end{bmatrix}. \quad (2.56)$$

El segundo elemento de la Ecuación (2.54) se obtiene fácilmente derivando las ecuaciones del punto en la imagen medido en píxeles (ver Ecuación (2.49)) sobre el conjunto de parámetros intrínsecos  $\xi = \{f_u, f_v, u_0, v_0\}$ :

$$\frac{\partial \mathbf{s}}{\partial \xi} = \begin{bmatrix} \frac{(f_x - u_0)}{f_u} & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \frac{(f_y - v_0)}{f_v} & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.57)$$

La matriz de interacción del control visual virtual para el caso de puntos como características visuales se forma, por tanto, a partir de las ecuaciones (2.56) y (2.57):



$$\mathbf{H}_s = \begin{bmatrix} \frac{f_u}{z_p^C} & 0 & -\frac{(f_x - u_0)}{z_p^C} & -\frac{(f_x - u_0)(f_y - v_0)}{f_v} & \frac{(f_x - u_0)^2 + f_u^2}{f_u} \\ 0 & \frac{f_v}{z_p^C} & -\frac{(f_y - v_0)}{z_p^C} & -\frac{(f_y - v_0)^2 + f_v^2}{f_v} & \frac{(f_x - u_0)(f_y - v_0)}{f_u} \\ -\frac{f_u(f_y - v_0)}{f_v} & \frac{(f_x - u_0)}{f_u} & 0 & 1 & 0 \\ \frac{f_v(f_x - u_0)}{f_u} & 0 & \frac{(f_y - v_0)}{f_v} & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.58)$$

En la [Tabla 2-3](#) se observa de un vistazo las diferencias existentes entre el control visual clásico descrito en el presente capítulo y el control visual virtual.

**Tabla 2-3** Diferencias entre el control visual clásico y el control visual virtual

	Control Visual Clásico	Control Visual Virtual
<b>Características iniciales</b> $s_1$	Obtenidas por la cámara del robot inicialmente	Aproximación de los parámetros de la cámara virtual y retroproyección inicial
<b>Características actuales</b> $s$	Obtenidas por la cámara del robot en cada iteración (en cada iteración se necesita obtener una nueva imagen para aportar información)	Retroproyectadas por la cámara virtual con los parámetros de esta iteración (no es necesario obtener nueva imagen)
<b>Características deseadas</b> $s_d$	Fijadas como objetivo por el usuario	Las obtenidas en la imagen real

En el Capítulo 4 se describirá una técnica para mejorar el comportamiento de los sistemas de control visual virtual para la calibración on-line de la cámara durante tareas de control visual. Se describirán los principales problemas del método para la obtención de los parámetros extrínsecos e intrínsecos y se aportarán soluciones que permitan obtener valores válidos de estos parámetros en tiempo real.

## 2.4 Conclusiones

A lo largo de este capítulo se ha mostrado una visión general de los sistemas de control visual, citando los principales modos de control, así como una evolución de las distintas líneas de investigación dentro de este campo hasta llegar a la actualidad. Una primera conclusión que se puede obtener de este estudio es que se trata de un campo asentado con muchas líneas de investigación aún abiertas.

Durante este capítulo se ha prestado una mayor atención a los sistemas de control visual indirectos basados en imagen ya que será ésta la estrategia de control básica empleada principalmente en los capítulos siguientes, por lo que durante la presente tesis se hará referencia a los distintos conceptos, resultados y desarrollos matemáticos que se han expuesto a lo largo de este capítulo.



Se han detallado las consideraciones necesarias para el desarrollo de un sistema de control visual basado en imagen. Se podría concluir que lo atractivo de estos sistemas es la posibilidad de realizar el guiado de un robot sin la necesidad de disponer de un conocimiento exhaustivo del entorno, y haciendo uso únicamente de información acerca de determinadas características del objeto implicado en la tarea. Sin embargo, se han detectado ciertos inconvenientes que es necesario solventar, en mayor medida cuando se aplican a entornos reales. Uno de estos inconvenientes es el hecho de que el sistema tiende a converger hacia unas determinadas características deseadas en la imagen, pero no se conoce cuál será su evolución en el espacio cartesiano 3-D. Esto, unido a los problemas de convergencia existentes cuando las características iniciales se encuentran lejanas a las deseadas, ha propiciado el diseño de un nuevo método para realizar el seguimiento de trayectorias definidas en el espacio imagen usando control visual.

En el presente capítulo se ha descrito también el control visual virtual. Esta técnica permite calcular los parámetros extrínsecos e intrínsecos de una cámara a partir de una imagen capturada por ésta. En el siguiente capítulo se describe un método de seguimiento intemporal de trayectorias en el espacio imagen que hace uso del control visual virtual precisamente para calcular la posición de la cámara con respecto al objeto que se pretende seguir.



# Seguimiento in

## 3 Seguimiento intemporal de trayectorias. Control indirecto

Como se ha desarrollado en el capítulo anterior, los sistemas de control visual basados en imagen presentan problemas de mínimos locales en tareas que suponen grandes desplazamientos. Además, dado que el control del robot manipulador se realiza en el espacio imagen, los sistemas clásicos de control basado en imagen son incapaces de proporcionar un control adecuado de la trayectoria en 3-D.

También en el capítulo anterior, se comentaron las técnicas de planificación de trayectorias encontradas en la literatura. La planificación de la trayectoria a seguir en el plano imagen permite obtener una trayectoria en el espacio 3-D conocida, al mismo tiempo que mejora la estabilidad del control basado en imagen al reducir el desplazamiento global a pequeños desplazamientos entre muestras de la trayectoria.

Los métodos encontrados para el seguimiento de estas trayectorias en la imagen presentan en su mayoría un comportamiento temporal. Tal como se explicará a lo largo del presente capítulo, este comportamiento impide el correcto funcionamiento de estos métodos de seguimiento ante cualquier tipo de

3.1	<b>Introducción</b> .....	53
3.2	<b>Generación de la trayectoria en el espacio imagen</b> .....	59
3.3	<b>Control visual basado en flujo de movimiento</b> .....	60
3.4	<b>Seguimiento intemporal basado en la norma de la Homografía 2-D</b> .....	64
3.5	<b>Seguimiento intemporal basado en control visual virtual</b> .....	72
3.5.1	Estabilidad del método .....	78
3.6	<b>Implementación</b> .....	79
3.6.1	Sistema de simulación .....	79
3.6.2	Arquitectura del sistema .....	79
3.7	<b>Resultados</b> .....	80
3.7.1	Resultados de simulación .....	80
3.7.2	Resultados experimentales. Comparativa con otros métodos de seguimiento .....	90
3.7.3	Estudio del comportamiento frente a variación de los parámetros del sistema .....	97
3.8	<b>Conclusiones</b> .....	104

interacción del robot con su entorno.

Los métodos intemporales estudiados tampoco ofrecen las características deseadas de precisión ni control de la velocidad. Por ello, el presente capítulo presenta lo que supone una aportación de la presente tesis: un método de seguimiento intemporal de trayectorias en el espacio imagen.

### 3.1 Introducción

En tareas en las que se desea posicionar un robot respecto a un elemento del entorno, la utilización de sistemas de control visual permite hacer uso de visión artificial para guiar el robot respecto a dicho elemento. El uso de un sistema de control visual basado en imagen frente a uno basado en posición ofrece distintas ventajas para este tipo de aplicaciones dentro de las cuales cabe mencionar su robustez frente a errores de modelado y perturbaciones externas [Hutchinson-1996]. Sin embargo, en este tipo de

sistemas de control visual la convergencia generalmente sólo está garantizada localmente [Chaumette-1998a].

Otro aspecto a tener en cuenta y que caracteriza a los sistemas de control visual clásicos basados en imagen es que se puede especificar la posición final del robot respecto a un objeto del entorno, sin embargo, no es posible definir la trayectoria que describirá el robot desde la localización inicial a la final en el espacio 3-D. Este efecto se muestra en la Fig. 3-1. Mientras que en el espacio de la imagen la trayectoria de las características tiende a seguir una línea recta, en el espacio Cartesiano 3-D esta trayectoria es impredecible y a menudo describe una parábola entre las configuraciones inicial y final.

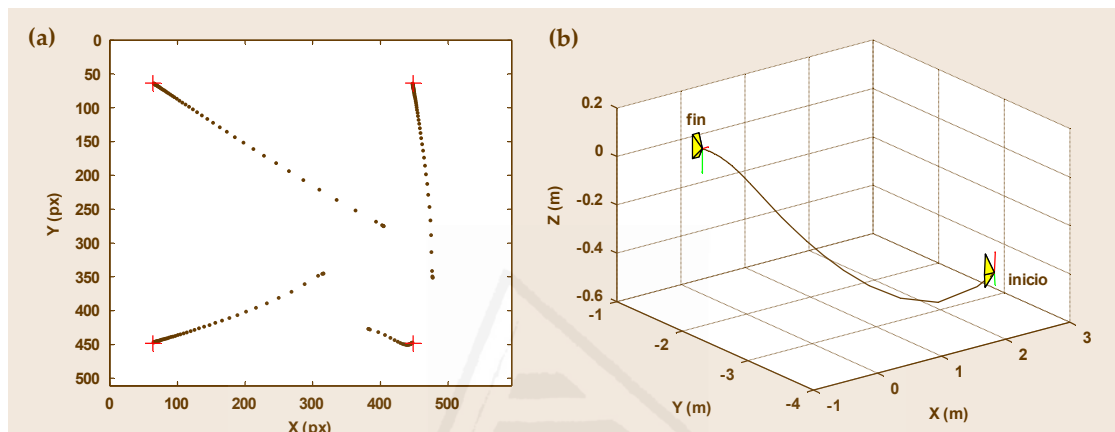


Fig. 3-1 (a) Trayectoria de las características extraídas en la imagen (b) Trayectoria seguida por la cámara

Los sistemas de control visual han sido hasta la actualidad utilizados en un amplio rango de aplicaciones [Corke-1993]. La mayoría de éstas son aplicaciones punto a punto en las que se desea alcanzar una determinada configuración de las características deseadas en la imagen a partir de una configuración inicial. Así, en tareas en las que se desea posicionar un robot respecto a un elemento del entorno, el empleo de sistemas de control visual permiten hacer uso de visión artificial para guiar el robot respecto a dicho elemento.

Como se ha mostrado en distintos trabajos [Hashimoto-1994, Chaumette-1998a, Chaumette-2006] si las configuraciones inicial y final se encuentran muy alejadas es difícil asegurar la convergencia, más aún si existen errores de modelado. El estudio de estabilidad en el sentido de Lyapunov desarrollado en el Capítulo 2 demuestra la estabilidad asintótica local del control visual basado en imagen, al tiempo que impide asegurar la estabilidad asintótica global del método. Una posible solución para incrementar el rango de estabilidad asintótica en los sistemas de control visual basados en imagen es el uso de pequeños pasos de articulares previamente planificados, limitando de esta forma el error de seguimiento a lo largo de la trayectoria planificada [Zanne-2002]. Asimismo, haciendo uso de un sistema de control visual clásico basado en imagen no se puede especificar una trayectoria entre las configuraciones inicial y deseada. Únicamente se indica qué configuración se desea alcanzar y no qué trayectoria se desea seguir para llegar a la configuración deseada.

Este último aspecto constituye un elemento fundamental en cualquier aplicación en la que se desea hacer uso de visión artificial para guiar un robot en un determinado

entorno de trabajo. En estas aplicaciones se desea guiar al robot de forma que se posicione respecto a un determinado objeto del entorno, pero a su vez se requiere que durante su posicionamiento se siga una trayectoria concreta que cumpla determinadas restricciones espaciales como la evitación de posibles colisiones con elementos del espacio de trabajo. Este ha sido uno de los principales motivos que ha propiciado la definición de un nuevo método de seguimiento de trayectorias, denominado seguimiento intemporal de trayectorias en la imagen basado en control visual virtual, que constituye una aportación descrita en este capítulo.

Como se ha referido anteriormente, los sistemas de control visual se clasifican en basados en posición y basados en imagen [Hashimoto-1994, Hutchinson-1996]. El primer caso está basado en el cálculo de un error en el espacio Cartesiano 3-D, para lo que se requiere un modelo CAD perfecto del entorno implicado en la tarea de control visual y un modelo de cámara calibrado. Este tipo de sistemas son muy sensibles a errores de modelado y a perturbaciones externas. En los sistemas de control visual basados en imagen el error es determinado directamente en la imagen. Esta aproximación asegura una mayor robustez respecto a errores de modelado, pero en general se obtiene un movimiento no adecuado de la cámara en el espacio cartesiano. Por otro lado, la convergencia de los sistemas de control visual basados en imagen generalmente sólo está garantizada localmente [Soatto-1996, Wunsch-1997], lo que permite asegurar una correcta convergencia si la configuración deseada de las características en la imagen se encuentran suficientemente cercanas a las actuales. En este capítulo se va a hacer uso de control basado en imagen como estrategia básica para realizar el seguimiento de trayectorias previamente generadas en el espacio de la imagen y, para confirmar la validez de los conceptos desarrollados, se ha aplicado a un sistema de cámara en el extremo de un robot.

La planificación de trayectorias en el espacio de la imagen permite resolver, como se ha comentado anteriormente, el problema de la estabilidad asintótica global de los sistemas de control visual basado en imagen. Hosoda et al. proponen en 1995 un generador de trayectorias aplicado a la evitación de obstáculos empleando sistemas de visión artificial estereoscópicos [Hosada-1995]. Posteriormente, los trabajos de Cowan et al. emplean funciones de navegación como base para el seguimiento de trayectorias, mostrando una formulación que permite asegurar la convergencia globalmente [Cowan-1999, Cowan-2002]. Zhang y Ostrowski describen una aplicación de control visual a robots móviles en una situación donde la localización del robot no es conocida o lo es con muy poca precisión [ZhangH-2002]. Remaizelles propone una base de datos de imágenes del entorno para controlar un robot mediante la planificación on-line de la trayectoria sin usar reconstrucción 3-D [Remaizelles-2007]. Es en el ámbito de la robótica móvil donde más esfuerzos se han realizado en la planificación de trayectorias en el plano de la imagen para guiar visualmente a los robots. Así, Bonin-Font et al. presentan en [Bonin-Font-2008] un resumen de los últimos avances realizados en la navegación visual de robots móviles. El guiado de los robots móviles mediante visión suele tratarse como un problema de seguimiento de trayectorias. El robot se mueve (normalmente teleoperado por un humano) en una fase previa de aprendizaje donde se almacenan las imágenes más características de la trayectoria que después debe repetir de manera autónoma. Blanc et al. describen en [Blanc-2005] un método de guiado visual de robots móviles basado en la regulación de homografías sucesivas que permiten

guiar al robot sin planificar explícitamente ninguna trayectoria. En [Cherubini-2008] se trata el problema de la planificación de una manera distinta. El robot móvil en este caso emplea control visual basado en imagen para realizar el seguimiento de una trayectoria dibujada en el suelo. El esquema más utilizado en el guiado visual de robots móvil presenta una trayectoria representada por fotogramas clave. En [Segvic-2009] se utiliza un sistema clásico de control visual basado en imagen donde la referencia del controlador es la diferencia en la abscisa del plano imagen del centroide de las características entre la imagen actual y el siguiente fotograma clave [Diosi-2007].

Todas estas aproximaciones son empleadas para alcanzar unas características deseadas, evitando obstáculos y garantizando las restricciones de visibilidad, pero no para realizar el seguimiento de una trayectoria completa. Sólo recientemente es posible encontrar trabajos relativos no sólo a la planificación de trayectorias en imagen, sino también a la utilización de sistemas de control visual para el seguimiento de estas trayectorias [Mezouar-2002b, Mezouar-2003, Malis-2004b, Chesi-2005, Chesi-2007a, Chesi-2007b, Mezouar-2009]. Así, Chesi et al. proponen en [Chesi-2005, Chesi-2007b] un método que genera la trayectoria en imagen manteniendo una línea recta entre la posición inicial y final en el espacio Cartesiano 3-D, manteniendo las características dentro de la imagen. En esta misma línea, Malis presenta un esquema de control visual capaz de seguir una línea recta en 3-D con la ventaja añadida de no depender de la correcta calibración de los parámetros intrínsecos de la cámara [Malis-2004b]. En [Mezouar-2002b], en primer lugar se describe un método para generar trayectorias cumpliendo ciertas restricciones espaciales que posteriormente serán empleadas para realizar el control de un robot utilizando una estrategia de control basado en imagen. Sin embargo, no se trata el problema de encontrar una trayectoria óptima para la cámara en el espacio Cartesiano 3-D. Este tema lo tratan Mezouar et al. en [Mezouar-2003]. La inclusión de campos de potencial repulsivos permiten tener en cuenta restricciones como la visibilidad o los límites articulares del brazo robótico. Se obtiene una solución analítica para la planificación de trayectorias óptimas en imagen pero sin tener en cuenta las restricciones. Estas se tienen en cuenta posteriormente en el seguimiento mediante los mencionados campos de potencial. En [Mezouar-2009] se obtiene la planificación de trayectorias óptimas teniendo en cuenta en esta planificación la restricción de visibilidad. El controlador utilizado por Mezouar et al. en los trabajos de planificación de trayectorias descritos realiza un seguimiento temporal de la trayectoria:

$$v_c = -\lambda \hat{\mathbf{L}}_s^+ (\mathbf{s} - \mathbf{s}^*(t)), \quad (3.1)$$

donde el vector dependiente del tiempo  $\mathbf{s}^*(t)$  representa la trayectoria deseada de las características en la imagen  $\mathbf{s}$ .

En [Park-2003] se describe un método para la generación de trayectorias en el espacio imagen consistente en simular la trayectoria que habría de describir el extremo del robot (la pinza en este caso) desde una localización inicial a la final. Una vez determinada la trayectoria se emplea un controlador como el descrito en [Mezouar-2002b] para realizar el seguimiento. El mismo controlador es usado también por Chesi et al. en [Chesi-2007b] para realizar el seguimiento de la trayectoria predefinida. La planificación se realiza minimizando una función de coste que tiene en cuenta parámetros como el área en imagen cubierta, la longitud de la trayectoria o la curvatura. De nuevo, las



restricciones de visibilidad, límite de las articulaciones o evitación de obstáculos se realiza con campos de potencial repulsivos durante el seguimiento.

El objetivo de este capítulo no es el de describir la planificación en el espacio de la imagen, y se hará la suposición de que se ha realizado una generación previa de la trayectoria que se desea seguir en la imagen. Tras disponer de esta información, se desarrollará la estrategia de seguimiento intemporal de trayectorias en la imagen basado en control visual virtual para realizar el seguimiento de la trayectoria deseada obteniendo un correcto desempeño en el espacio Cartesiano 3-D.

Centrándonos en los sistemas de control que permiten el seguimiento de las trayectorias definidas con los métodos previamente descritos, en [Mezouar-2002b] se muestra una aproximación consistente en un sistema de control visual basado en imagen para el seguimiento de una trayectoria en la imagen dependiente del tiempo. En contraste con la aproximación descrita por Mezouar y Chaumette, en [Schramm-2006, Schramm-2007] se trata el problema del seguimiento de las trayectorias predefinidas como una secuencia de tareas de posicionamiento mediante control visual. Utiliza la ley de control visual clásica mostrada en (2.31) para posicionar al robot entre dos posiciones consecutivas de la trayectoria. Cuando el error se anula (la velocidad del robot es cero), el sistema guía al robot hacia la siguiente referencia de la trayectoria. Este proceso se repite hasta que el robot visita todas las referencias de la trayectoria. Así, el sistema no es capaz de mantener una velocidad constante durante el seguimiento, mostrando además un comportamiento indeseado de movimiento y parada (ver Fig. 3-2). Este método de seguimiento presenta, sin embargo, un comportamiento intemporal, ya que la siguiente referencia a visitar de la trayectoria no depende del tiempo, sino de la posición actual y de la última referencia visitada. En [Pomares-2004a, Pomares-2005c, Cherubini-2009] se emplea control visual basado en imagen para el seguimiento de trayectorias de forma independiente del tiempo empleando los denominados flujos de movimiento. Si se formula el seguimiento como una trayectoria en la imagen dependiente del tiempo, la configuración actual y la deseada se encontrarán siempre separadas por un intervalo de tiempo,  $\Delta t$ . Sin embargo, el hecho de alcanzar una determinada configuración de las características en un instante de tiempo determinado no es crítico comparado con la necesidad de mantener la trayectoria en la imagen. De esta manera, si un sistema de control visual basado en imagen es empleado para el seguimiento de trayectorias dependientes del tiempo, puede correr el riesgo de no seguir la trayectoria adecuada a costa de intentar mantener las restricciones temporales. Por otro lado, el hecho de que se alcancen unas características deseadas en un instante de tiempo determinado no garantiza el correcto seguimiento de la trayectoria. Pomares y Torres, en el denomina-

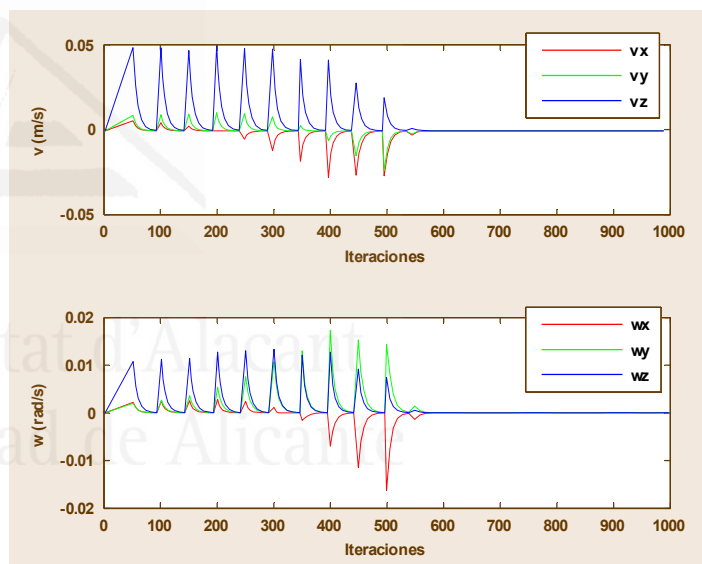


Fig. 3-2 Velocidad variable en el seguimiento usando un sistema estándar de control visual basado en imagen

do. En [Pomares-2004a, Pomares-2005c, Cherubini-2009] se emplea control visual basado en imagen para el seguimiento de trayectorias de forma independiente del tiempo empleando los denominados flujos de movimiento. Si se formula el seguimiento como una trayectoria en la imagen dependiente del tiempo, la configuración actual y la deseada se encontrarán siempre separadas por un intervalo de tiempo,  $\Delta t$ . Sin embargo, el hecho de alcanzar una determinada configuración de las características en un instante de tiempo determinado no es crítico comparado con la necesidad de mantener la trayectoria en la imagen. De esta manera, si un sistema de control visual basado en imagen es empleado para el seguimiento de trayectorias dependientes del tiempo, puede correr el riesgo de no seguir la trayectoria adecuada a costa de intentar mantener las restricciones temporales. Por otro lado, el hecho de que se alcancen unas características deseadas en un instante de tiempo determinado no garantiza el correcto seguimiento de la trayectoria. Pomares y Torres, en el denomina-



do control visual basado en flujo de movimiento codifican la tarea a desarrollar por el robot en el espacio de configuraciones de la imagen, es decir, especificando una configuración deseada  $s_d$  para cada posible configuración  $^k s$ . Sin embargo, este método presenta las siguientes limitaciones:

- Es incapaz de mantener una velocidad constante durante el seguimiento.
- Tiene un comportamiento oscilatorio ante aumentos de la velocidad de seguimiento.
- No permite asegurar en todo momento que la posición 3-D de la cámara representa una configuración válida al tratar individualmente cada característica visual.

En el presente capítulo se detalla un método de seguimiento de trayectorias en el espacio imagen también independiente del tiempo que mejora las limitaciones mencionadas. Para conseguir el comportamiento intemporal, al igual que Pomares y Torres con el control visual basado en flujo de movimiento, se codifica la tarea en el espacio de configuraciones de la imagen [GarciaGJ-2007c, GarciaGJ-2009d]. A partir del muestreo de la trayectoria en la imagen el sistema determina cuál debe ser la siguiente configuración deseada  $s_d$  para ser empleada por un sistema de control visual basado en imagen. El método propuesto en este capítulo trata de mantener una velocidad constante en el seguimiento de la trayectoria. Para ello, se busca la configuración  $^k s$  dentro de la trayectoria muestreada que supera esa velocidad deseada. El ajuste preciso de la velocidad se consigue generando una trayectoria 3-D para la cámara entre las configuraciones  $^k s$  y  $^{k-1} s$ . Para ello se hace uso del control visual virtual, que permite obtener la posición y orientación de la cámara desde las que se observan esas dos configuraciones. El resultado es un método que permite realizar de forma intemporal el seguimiento de una trayectoria previamente definida en el espacio imagen.

A lo largo del capítulo se detallarán las características del sistema de seguimiento intemporal de trayectorias en la imagen basado en control visual virtual, mostrando la precisión alcanzada para el seguimiento de trayectorias tanto en el espacio imagen como en el espacio Cartesiano 3-D. Para ello, primero se detalla cómo se genera la trayectoria en el espacio imagen que se pretende seguir. Posteriormente se describirá el método de control visual basado en flujo de movimiento con la intención de detectar sus carencias y defectos para mejorar el desempeño de los sistemas de seguimiento intemporal basados en control visual. El siguiente apartado, describe un primer intento de solventar el principal problema detectado en los sistemas de control visual basado en flujo de movimiento: el tratamiento separado de cada característica visual. Se describe un método de seguimiento basado en la norma de la matriz de homografía. Los resultados obtenidos con este nuevo método propuesto no permiten asegurar la convergencia en cualquier situación y por ello, en el Apartado 3.5 se presenta un método de seguimiento intemporal basado en control visual virtual que, tratando en conjunto las características visuales, permite además mantener una velocidad constante durante el seguimiento. Finalmente, se presentan los resultados obtenidos, comparando el método propuesto con los métodos anteriormente presentados para el seguimiento de trayectorias en el espacio imagen basado en control visual.

### 3.2 Generación de la trayectoria en el espacio imagen

A partir de una trayectoria del robot,  $\gamma(t)$ , generada con el algoritmo descrito en [Pomares-2004b, Pomares-2006d], se obtiene la trayectoria discreta en 3-D,  $\tau$ , que debe seguir el robot para realizar satisfactoriamente la tarea. Esta trayectoria discreta es una secuencia de  $N$  valores discretos de  $\gamma(t)$ , cada uno representando una posición intermedia de la cámara  $\tau = \{\gamma^k / k \in 1..N\}$ . La trayectoria en la imagen de las características del objeto implicado en la tarea de control visual se obtiene a partir de esta trayectoria 3-D,  $\tau$ . Esta trayectoria discreta en la imagen estará formada por  $M$  puntos, de forma que en un instante  $k$ , se tendrá una determinada configuración  ${}^k\mathbf{s} = \{f_i^k / i \in 1..M\}$ , donde  $f_i^k$  representa la posición en el espacio imagen del punto característico  $i$  en el instante  $k$ . La trayectoria 3-D queda de esta forma codificada en un vector de configuraciones  $T = \{\mathbf{s}^k / k \in 1..N\}$ . La Fig. 3-3 muestra la notación para las trayectorias muestreadas, tanto en 3-D, como en el plano imagen.

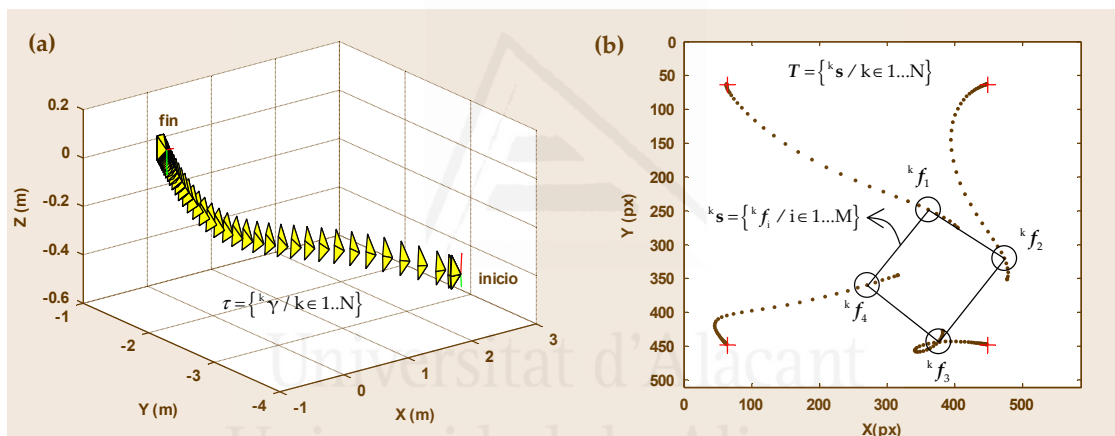


Fig. 3-3 Muestreo de la trayectoria deseada en el espacio cartesiano 3-D y en la imagen

Dada una determinada característica, la evolución de  $f_i^k$  (véase un ejemplo en la Fig. 3-4 en la que se han considerado muestras de una imagen de 50 por 50) se corresponde con la trayectoria discreta que se desea que siga la característica en la imagen a lo largo de la tarea.

Éste será el muestreo de la trayectoria deseada en la imagen que deberá ser seguida utilizando el sistema de seguimiento intemporal de trayectorias en la imagen basado en control visual virtual.

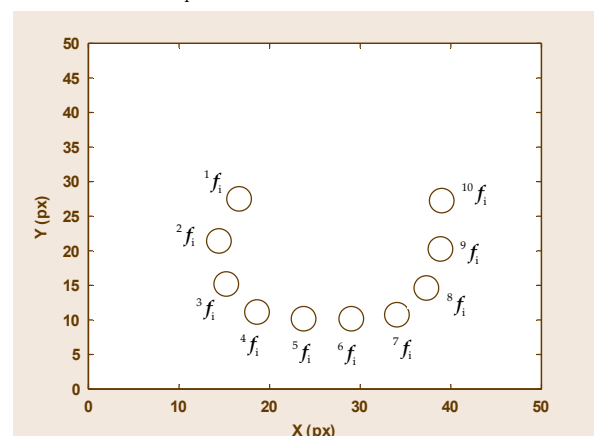


Fig. 3-4 Trayectoria discreta  $f_i^k$  de una característica en la imagen

Antes de describir el método de seguimiento propuesto para el seguimiento intemporal de trayectorias en la imagen se detallará el control visual basado en flujo de movimiento, de forma que se puedan observar los principales problemas encontrados en este método.

### 3.3 Control visual basado en flujo de movimiento

En el presente Capítulo, se describirá un nuevo sistema de seguimiento intemporal de trayectorias en la imagen que trata de resolver los problemas encontrados en los sistemas de control visual basado en flujo de movimiento [Pomares-2005c], al tiempo que aproveche las principales ventajas que aporta el método, como el seguimiento intemporal de las trayectorias.

El flujo de movimiento es un campo de vectores que converge hacia la trayectoria deseada en la imagen. Se obtiene utilizando trayectorias no dependientes del tiempo especificadas en el espacio de la imagen. El flujo de movimiento permite determinar la configuración deseada en la imagen a partir de una dada y, por lo tanto, realizar el seguimiento de la trayectoria independientemente del tiempo.

El flujo de movimiento,  $\Phi$ , se define como:

$$\Phi: \mathcal{S} \rightarrow T\mathcal{S}, \quad (3.2)$$

donde  $\mathcal{S}$  es el espacio de la imagen y  $T\mathcal{S}$  es el espacio tangente a la imagen. Se observa que el flujo de movimiento define un vector tangente en cada punto de la imagen de manera que proporciona un vector de velocidad en la imagen deseada en cada configuración posible. El flujo de movimiento queda definido realizando el trazado de un conjunto de vectores que convergen a la trayectoria deseada en la imagen. En general, el flujo de movimiento tiene las dos siguientes propiedades:

- Sus valores en cada punto de la trayectoria deseada son tangentes a dicha trayectoria.
- Fuera de la trayectoria tienden a reducir errores en el seguimiento.

Por lo tanto, el flujo de movimiento es un campo de vectores que indica la dirección en la cual deben encontrarse las características deseadas empleadas como referencias por un sistema de control basado en imagen, permitiendo de esta manera el seguimiento de la trayectoria. Así, considerando un sistema de control basado en imagen, la velocidad a aplicar al robot respecto al sistema de coordenadas de la cámara será:

$$\mathbf{v}^c = -k \cdot \hat{\mathbf{L}}_f^+ \cdot \mathbf{e}_f, \quad (3.3)$$

donde  $k$  es la ganancia del controlador proporcional;  $\hat{\mathbf{L}}_f^+$  es la pseudoinversa de la matriz de interacción,  $\mathbf{e}_f = \mathbf{s} - \mathbf{s}_d$ ,  $\mathbf{s} = [f_1, f_2, \dots, f_M]^T$  son las características extraídas en la imagen,  $\mathbf{s}_d = [f_1 + m_1 \Phi_1(f_1), f_2 + m_2 \Phi_2(f_2), \dots, f_M + m_M \Phi_M(f_M)]^T$ ,  $\Phi_i$  es el flujo de movimiento para la característica  $i$ , y  $\mathbf{m} = \{m_1, m_2, \dots, m_M\}$  determina la velocidad de progresión, de forma que modificando el valor de  $\mathbf{m}$  se obtendrá un seguimiento más o menos rápido.

Para definir el flujo de movimiento se va a considerar que, para una característica  $i$ , se desea seguir una trayectoria parametrizada en la imagen  $f_{id}: \Gamma \rightarrow \mathcal{S}$  donde  $\Gamma \subset \mathcal{R}$ , de

forma que si  $\Gamma$  fuera el tiempo se tendría la trayectoria clásica en la imagen dependiendo del tiempo. Considerando que  $f_i$  son las coordenadas de la característica  $i$  en la imagen y que las coordenadas del punto más cercano en la trayectoria deseada son  $f_{\text{ind}}=(f_{\text{xind}}, f_{\text{yind}})$ , se define el vector de error  $E_i(f_i)=(E_{xi}, E_{yi})$  donde  $E_{xi}=(f_{xi}-f_{\text{xind}})$  y  $E_{yi}=(f_{yi}-f_{\text{yind}})$ . A partir de este error se define la función de potencial  $U_i: \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}$  calculada según se describe posteriormente.  $U_i$  aumenta según  $f_i$  se desvía de su localización deseada  $f_{\text{ind}}$  y alcanza su mínimo cuando el error es cero.

A partir de las funciones anteriores se define el flujo de movimiento para una característica  $i$ ,  $\Phi_i$ , como una combinación lineal de dos términos:

$$\Phi_i(f_i) = \begin{pmatrix} \Phi_{xi}(f_i) \\ \Phi_{yi}(f_i) \end{pmatrix} = G_1(f_i) \cdot \begin{pmatrix} \frac{\partial f_{\text{xid}}(\tau)}{\partial \tau} \\ \frac{\partial f_{\text{yid}}(\tau)}{\partial \tau} \end{pmatrix} - G_2(f_i) \cdot \begin{pmatrix} \frac{\partial U_i}{\partial E_{xi}} \\ \frac{\partial U_i}{\partial E_{yi}} \end{pmatrix}, \quad (3.4)$$

donde  $G_1, G_2: \mathfrak{S} \rightarrow \mathfrak{R}^+$  son funciones de peso de forma que  $G_1 + G_2 = 1$ . El primer término de la expresión (3.4),  $\dot{f}_{\text{id}}(\tau)$ , se obtiene calculando los coeficientes de Taylor de la trayectoria deseada.

Como se muestra en [Li-2001], fruto de la aplicación del campo de velocidad codificado en  $\Phi_i$  la evolución esperada para una característica  $i$ , y considerando un valor de  $\beta > 0$ , será:

$$\dot{f}_i = \beta \cdot \Phi_i. \quad (3.5)$$

Con lo que  $E_i$  variará según:

$$\dot{E}_i = -\beta \cdot G_2(f_i) \cdot \frac{\partial U_i}{\partial E_i}. \quad (3.6)$$

Por lo tanto, el error evoluciona en la dirección del gradiente negativo del potencial y convergerá en un punto de  $U_i$  en el que  $E_{xi}=E_{yi}=0$ , con lo que  $f_i \rightarrow f_{\text{id}}$ .

A continuación se describe la función de potencial empleada por el flujo de movimiento para una única característica, por lo tanto, por claridad, se omite el subíndice que indica que característica se está considerando.

La función de potencial  $U$  puede ser utilizada para medir la precisión en el seguimiento, por lo tanto, debe alcanzar su valor más bajo cuando el error  $E = f - f_{\text{nd}}$  sea cero y aumentar según  $f$  se desvía de su localización deseada  $f_{\text{nd}}$ , siendo  $f$  la característica extraída en la imagen y  $f_{\text{nd}}$  la característica en  $f_d(\tau)$  más cercana a  $f$ . Este aspecto habrá de considerarse a la hora de definir la función de potencial y, para ello, se va a considerar como  $I$  la imagen deseada o imagen que se obtendría tras representar la trayectoria deseada.

El primer paso para determinar la función de potencial es calcular el gradiente de  $I$ . Para ello se utiliza la combinación de operaciones de morfología matemática consistentes en la sustracción de la erosión,  $\varepsilon$ , de la imagen  $I$  de la dilatación,  $\delta$ , de  $I$  [Serra-1983]. Tanto en la erosión como en la dilatación se ha empleado un elemento estructurante cuadrado de tamaño  $3 \times 3$ . Como resultado de estas operaciones se obtiene la imagen gradiente  $I_g$ :

$$I_g = \psi(I) = \delta(I) - \varepsilon(I). \tag{3.7}$$

En la Fig. 3-5.(a) se muestra un ejemplo de imagen  $I$  que representa la trayectoria deseada de una característica, que se corresponde con la representada en la Fig. 3-4. En la Fig. 3-5.(b) se muestra la imagen resultado de calcular su gradiente,  $I_g$ .

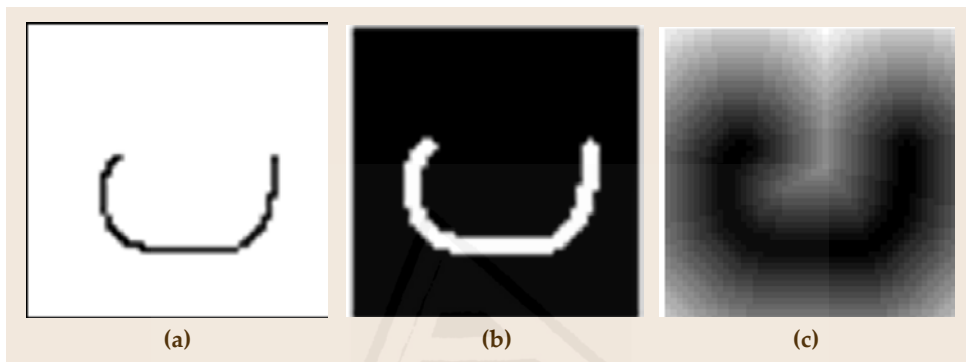


Fig. 3-5 (a) Trayectoria deseada en la imagen  $f_d(\tau)$  para una característica. (b) Imagen gradiente (c) Mapa de distancias

Una vez obtenida la imagen  $I_g$ , el siguiente paso para determinar la función de potencial consiste en generar un mapa de distancias, que crea una imagen distancia  $I_d$  a partir de la imagen binaria  $I_g$ . El valor de  $I_d$  en el píxel  $x$  es la distancia Euclídea de  $x$  al complemento de  $I_g$ , es decir, la distancia de  $x$  al punto más cercano del complemento de  $I_g$  [Lotufo-2001]:

$$I_d = \Psi_{B_c}(I_g) = \sum_i \varepsilon_{i,B_c}(I_g), \tag{3.8}$$

Donde  $\varepsilon$  lleva a cabo la erosión de la imagen  $I_g$  haciendo uso de un elemento estructurante cuadrado de tamaño  $3 \times 3$ ,  $B_c$ . El mapa de distancias  $I_d$  es una imagen que almacena en cada píxel información relativa a su menor distancia hasta  $f_d(\tau)$  y, por lo tanto, puede ser empleada como función de error. En la Fig. 3-5.(c) se muestra el mapa de distancias para la trayectoria de ejemplo de la Fig. 3-4. A partir de esta última figura es posible generar una representación tridimensional del mapa de distancias (Fig. 3-6) donde el valor de la coordenada  $z$  representa la distancia de cada píxel hasta el píxel más cercano dentro de la trayectoria deseada.



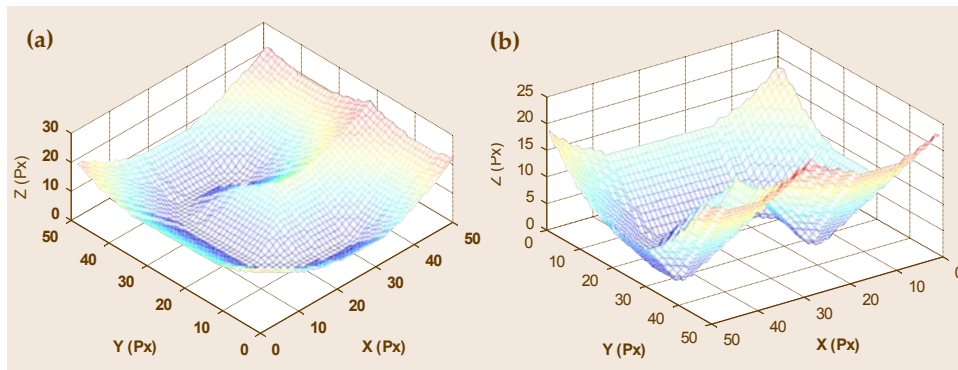


Fig. 3-6 Representación tridimensional del mapa de distancias

En esta figura se puede observar que, para cada píxel de la imagen, es posible determinar el píxel más cercano en la trayectoria deseada realizando un descenso por gradiente. Como se observa en esta figura, durante el descenso por gradiente nunca se producirán mínimos locales.

A partir de la representación del mapa de distancias de la Fig. 3-6 se obtiene una representación de líneas equipotenciales (Fig. 3-7.(b)) que muestra la distribución de la función de potencial  $U$  obtenida.

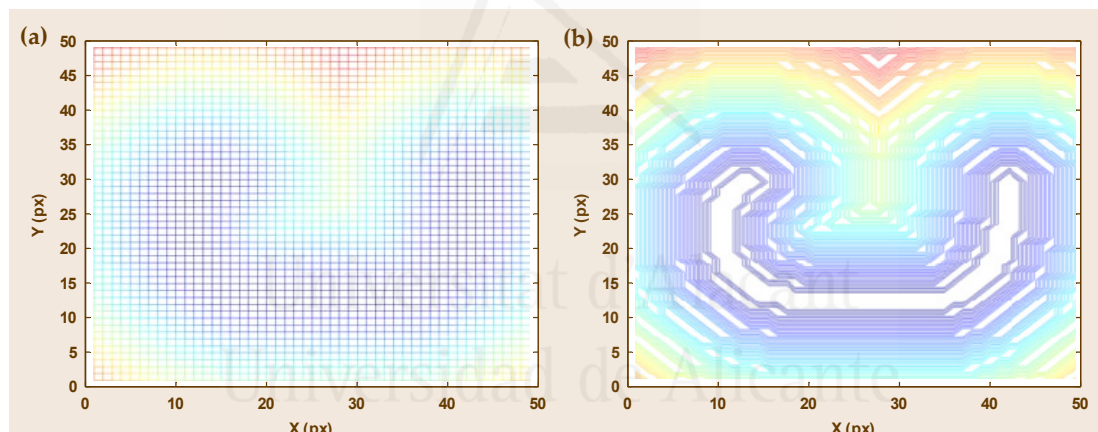


Fig. 3-7 (a) Vista superior del mapa de distancias de la Figura 4-5 (b) Líneas equipotenciales

La Fig. 3-7.(a) es la vista superior del mapa de distancias tridimensional representado en la Fig. 3-6. Se observa que esta vista se corresponde con las líneas de potencial mostradas en la Fig. 3-7.(b).

A partir de  $U$  se obtienen las componentes  $x$  e  $y$  del gradiente numérico bidimensional. Este gradiente crea una matriz de vectores que apuntan en la dirección en la que los valores de  $U$  aumentan. Por lo tanto, si se representa  $-\nabla U$  para el caso de la trayectoria de ejemplo mostrada en la Fig. 3-4, se obtendrá el campo de vectores representado en la Fig. 3-8 que dirige cada punto de la imagen hacia el píxel más cercano en  $f_d(\tau)$ .

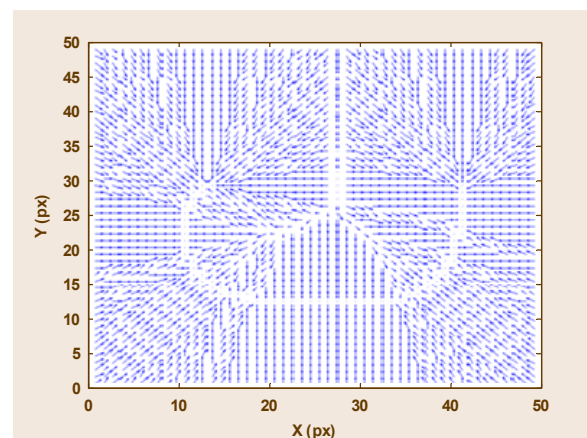


Fig. 3-8 Campo de vectores correspondiente al gradiente negativo de la función de potencial

Una consideración aparte debe realizarse



con la velocidad de progresión. Hasta ahora se ha considerado un conjunto de  $M$  características de forma que cada una de las cuales debe seguir una trayectoria deseada en la imagen. Sin embargo, cada una de las  $M$  trayectorias debe progresar coordinadamente, de manera que las trayectorias más cortas reduzcan su velocidad para adaptarse a las más largas. Este es el principal problema del flujo de movimiento. No se tratan las características visuales del objeto en su conjunto. Para resolver este problema, se incluyen en el método una serie de mecanismos para coordinar las velocidades de cada una de las  $M$  trayectorias. Estos mecanismos impiden realizar el seguimiento con una velocidad constante. Además, al intentar aumentar la velocidad de seguimiento, se introduce mucha oscilación debido a que el sistema debe rectificar el error cometido al pasarse de la trayectoria deseada y tener que esperar la rectificación en el resto de trayectorias. Por ello, en las siguientes secciones se presentan distintas propuestas para mejorar el método de control visual basado en flujo de movimiento.

En resumen, los problemas que presentan los sistemas de control visual basado en flujo de movimiento motivan el diseño de un nuevo sistema de seguimiento de trayectorias en el espacio imagen con las siguientes características:

- Comportamiento intemporal como el ofrecido por los sistemas de control visual basado en flujo de movimiento.
- Velocidad constante durante el seguimiento.
- Comportamiento menos oscilatorio ante aumentos de la velocidad de seguimiento.
- Debe permitir asegurar en todo momento que la posición 3-D de la cámara representa una configuración válida al tratar las características visuales como un conjunto.

A continuación se presenta una primera aproximación para agrupar las características y realizar a partir del conjunto el seguimiento de la trayectoria deseada.

### **3.4 Seguimiento intemporal basado en la norma de la Homografía 2-D**

Como se ha explicado en el apartado anterior, el control visual basado en flujo de movimiento trata cada característica por separado. Este es, sin duda, el principal problema del método, ya que no permite garantizar teóricamente que en un momento dado la configuración de las características en la imagen se corresponda con una posición 3-D válida. Para solucionarlo, en una primera aproximación, se va a intentar agrupar las características mediante la matriz de homografía 2-D [GarcíaGJ-2007b]. Esta matriz relaciona puntos 3-D situados sobre un plano en dos imágenes obtenidas por distintas cámaras o por la misma cámara desde distintas posiciones de ésta (ver Fig. 3-9).

Si la cámara capta dos imágenes de un mismo plano  $\Pi$ , existe una matriz que relaciona los puntos del plano vistos en una de las imágenes con los mismos puntos vistos en la otra imagen. Sea  $P$  un punto situado en el plano  $\Pi$ , dicho punto se proyecta en la primera imagen en la posición  $p$  y en la segunda imagen en  $p'$ . La homografía proyectiva se define como:

$$\mu p = Gp'. \quad (3.9)$$

La matriz de homografía 2-D se obtiene a partir de la expresión (3.9) si se tienen al menos cuatro puntos coplanares [Hartley-2003].

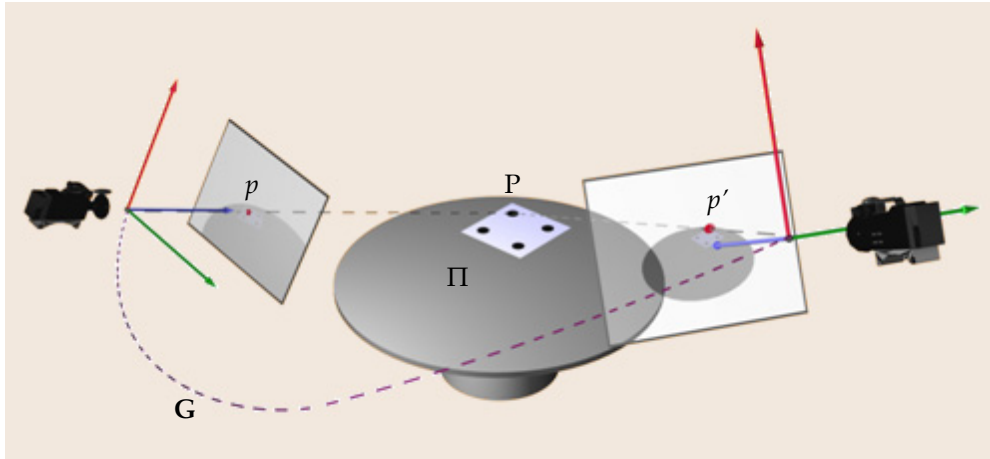


Fig. 3-9 Homografía 2-D

Mediante la matriz de homografía se consigue agrupar las características observadas del objeto. Este era el primer paso a resolver, ya que con control visual basado en flujo de movimiento se tenía un excelente controlador para seguir la trayectoria predefinida de una característica en concreto. Sin embargo, al tener que seguir todas las trayectorias al mismo tiempo, se debe introducir un mecanismo que frene aquella trayectoria que va más rápida.

A continuación se describe el método desarrollado a partir de esta matriz de homografía 2-D para seguir trayectorias previamente definidas en el plano imagen (tal y como se ha explicado en el Apartado 3.2).

El primer paso es construir el vector de matrices de homografía 2-D correspondiente a la trayectoria deseada,  $M = \{^k G / k \in 1..N-1\}$ . A partir de la trayectoria deseada,  $T$ , se tiene la posición en imagen de los puntos característicos para cada posición  $k$  de la cámara,  $^k s$  (véase Apartado 3.2). Seleccionando como base siempre la primera posición de la trayectoria,  $^1 s$ , se calculan las matrices de homografía 2-D para el resto de muestras de la trayectoria, obteniendo así el vector de matrices de homografía que codifica la trayectoria deseada.

Se ha conseguido de esta forma agrupar las características en una matriz. Sin embargo, la matriz de homografía 2-D es una matriz de 3x3, donde se tienen 8 gdl, y por lo tanto se podría entender que no se ha conseguido el objetivo que se deseaba. Hace falta un valor que represente de forma lo más precisa posible la información almacenada en la matriz de homografía.

$$\mathbf{G} = \begin{pmatrix} g_{11} & g_{12} & g_{13} \\ g_{21} & g_{22} & g_{23} \\ g_{31} & g_{32} & g_{33} \end{pmatrix}. \quad (3.10)$$

Para resolver el problema, se hace uso de una norma definida para este tipo de matriz de homografía 2-D. Esta norma, se calcula de la siguiente forma:

$$\|G\| = k_1 \cdot \sqrt{g_{13}^2 + g_{23}^2} + k_2 \cdot \sqrt{g_{31}^2 + g_{32}^2} + k_3 \cdot (g_{11} \cdot g_{22} - g_{12} \cdot g_{21}). \quad (3.11)$$

Para su construcción se ha tenido en cuenta lo que representa cada componente  $g_{ij}$  de la matriz de homografía  $G$ . Tanto el primer término del sumando como el segundo engloban una traslación. El tercer término engloba una transformación afín, así como el escalado y la rotación. Las constantes  $k_1, k_2, k_3$  representan el peso que se le quiera dar a cada componente dependiendo de la trayectoria que se quiera codificar. Para los ejemplos que se muestran posteriormente se han utilizado los siguientes valores:

$$\begin{aligned} k_1 &= 1, \\ k_2 &= 1000000, \\ k_3 &= 50. \end{aligned} \quad (3.12)$$

Dado que se tiene codificada la trayectoria deseada como un vector de matrices de homografía 2-D, se calcula también el vector que almacena la norma de cada una de estas matrices.

El siguiente paso del método es transformar el espacio de la imagen a lo que se ha denominado espacio de las normas. El espacio de normas (ver Fig. 3-10) es una figura donde el eje Y representa la norma de la matriz de homografía, y el eje X representa la posición en el vector de matrices de homografía que codifica la trayectoria deseada,  $M$ .

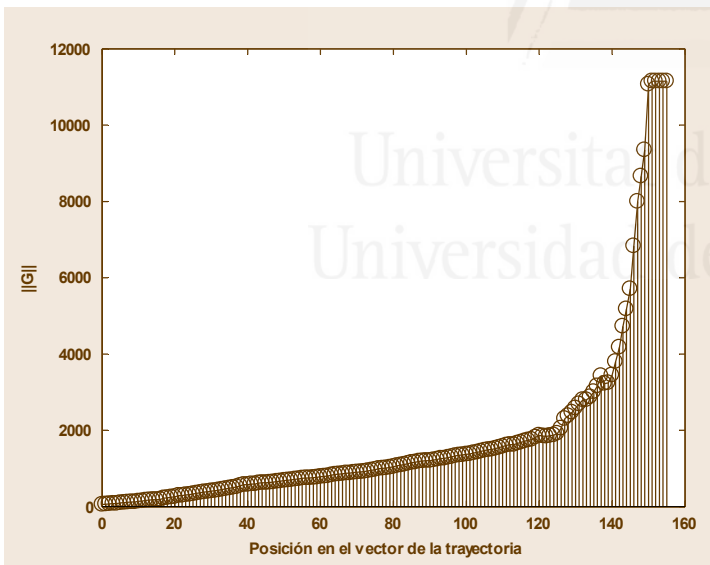


Fig. 3-10 Espacio de normas de las matrices de homografía 2-D

El objetivo del sistema es mantener una velocidad constante durante el seguimiento. Para ello, la velocidad que se aplicará al robot viene dada por la ley de control visual basada en imagen:

$$v = -\lambda \cdot \hat{L}_s^+ \cdot (s - Gs_1), \quad (3.13)$$

donde  $\lambda$  es la ganancia del controlador proporcional y  $\hat{L}_s^+$  es la pseudoinversa de la matriz de interacción.

Se quiere relacionar la variación en la velocidad con variaciones en el producto  $Gs_1$ , que permitiría reducir el error en la velocidad modificando la posición de las características en la imagen. Para ello, se calcula la matriz de interacción que relaciona variaciones en la velocidad con variaciones en  $Gs_1$ :

$$\frac{\partial v}{\partial Gs_1} = \lambda \cdot \hat{L}_s^+. \quad (3.14)$$

La inversa de esta matriz permitirá obtener valores de variaciones en las características en la imagen con variaciones en la velocidad de seguimiento:

$$\frac{\partial \mathbf{G} \mathbf{s}_1}{\partial v} = \frac{1}{\lambda} \cdot \hat{\mathbf{L}}_s. \quad (3.15)$$

Dado un error en velocidad, aplicando (3.15) se obtiene la variación de las características en la imagen necesaria,  $\Delta \mathbf{s}$ , para anular dicho error.

Estas variaciones de las características para mantener la velocidad no permitirían seguir la trayectoria deseada, ya que son variaciones en una dirección arbitraria de la cámara, pero que mantienen la velocidad constante que se desea. Para llevar esas variaciones en imagen hacia la trayectoria deseada se calcula la nueva matriz de homografía  $\mathbf{G}'$  que resulta de relacionar la primera posición de la trayectoria,  ${}^1\mathbf{s}$  con la posición resultante de sumar las variaciones obtenidas a la posición actual  $\mathbf{s} + \Delta \mathbf{s}$ .

A partir de la imagen obtenida en la iteración actual del seguimiento, se calcula la matriz de homografía que relaciona los puntos en la primera posición de la trayectoria,  ${}^1\mathbf{s}$ , con los puntos en la imagen adquirida,  $\mathbf{s}$ .

A continuación, se calcula la norma de estas dos matrices de homografía  $\mathbf{G}$  y  $\mathbf{G}'$ . El sistema utilizará la diferencia de estas dos normas,  $\|\mathbf{G}'\| - \|\mathbf{G}\|$ , para obtener una medida de hacia dónde se debe mover el sistema en el espacio de normas para seguir la trayectoria deseada.

Tal como muestra la Fig. 3-11, con el error en norma, se generan las dos rectas de error y se avanza hacia la siguiente posición en la trayectoria. La posición de las características en la imagen se obtienen a partir de la matriz de homografía  $\mathbf{G}_{des}$  que se obtiene de interpolar entre la última matriz visitada de la trayectoria deseada,  ${}^k\mathbf{G}$ , y la siguiente,  ${}^{k+1}\mathbf{G}$ . De esta forma, se asegura que las características en la imagen están dentro de la trayectoria deseada, aun manteniendo la velocidad deseada.

Para interpolar entre dos matrices de homografía se interpolan sus elementos linealmente. Esto permite obtener un comportamiento lineal de las características en la imagen tal como muestra la Fig. 3-12.(a). Este resultado se obtuvo tras probar la interpolación de la descomposición de las transformaciones proyectivas que generan la matriz de homografía.

La descomposición de transformaciones proyectivas permite obtener la matriz de homografía  $\mathbf{G}$  como resultado de distintas transformaciones proyectivas:

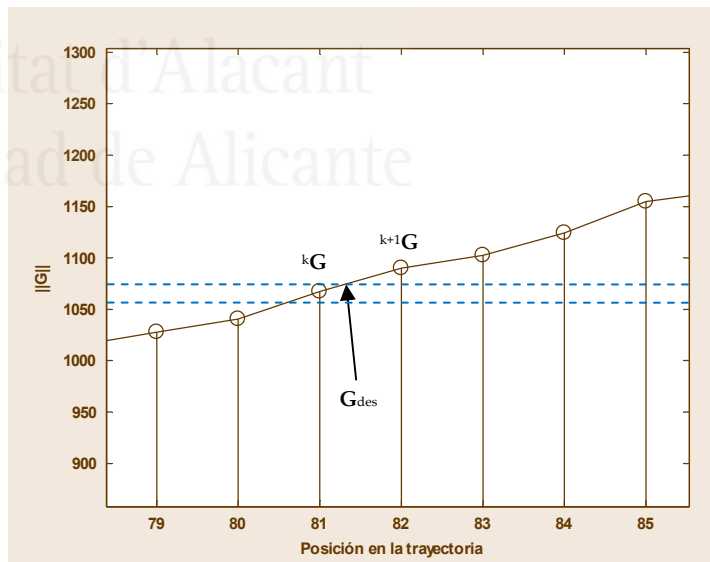


Fig. 3-11 Espacio de normas de las matrices de homografía 2-D

$$G = G_s G_A G_P = \begin{bmatrix} sR & t \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K & 0 \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I & 0 \\ v^T & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & t \\ v^T & 1 \end{bmatrix}. \quad (3.16)$$

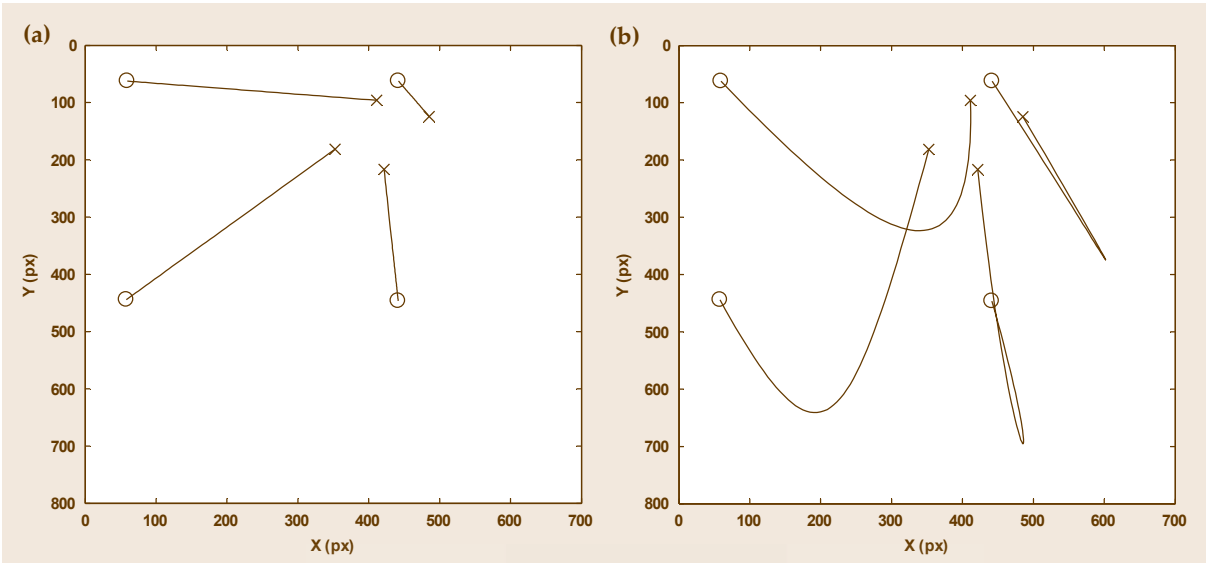


Fig. 3-12 (a) Evolución lineal de las características en la interpolación lineal de los elementos de las matrices de homografía 2-D (b) Evolución no lineal de las características en la interpolación lineal de la descomposición de transformaciones proyectivas de las matrices de homografía 2-D

Esta descomposición es única si se elige un escalado,  $s$ , positivo;  $K$  es una matriz triangular superior que cumple que su determinante es 1;  $R$  es la matriz de rotación

generada a partir del ángulo  $\theta$  sobre el eje  $Z$  de la cámara; y  $t$  es un vector que almacena las traslaciones de la cámara en el plano  $XY$ . A partir de esta descomposición se intentó interpolar linealmente cada uno de los parámetros que aparecen en esta descomposición:  $s, \theta, t_x, t_y, v_x, v_y, k_{11}, k_{12}, k_{22}$ . El resultado, como puede observarse en la Fig. 3-12.(b), es una evolución de las características en la imagen no deseada, ya que se trata de parábolas que se pueden salir del plano imagen. Por eso se ha elegido finalmente la interpolación lineal de cada elemento de la matriz de homografía por separado, lo que permite obtener una evolución lineal de las características entre las dos homografías.

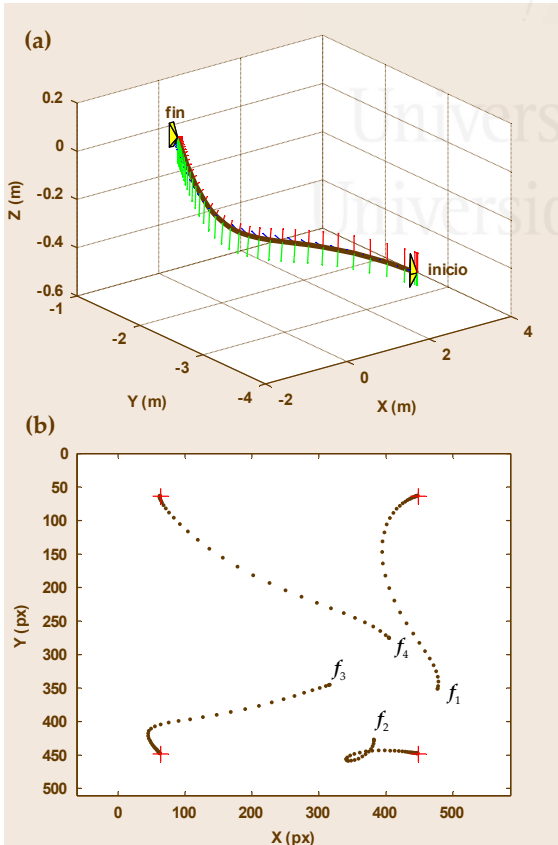
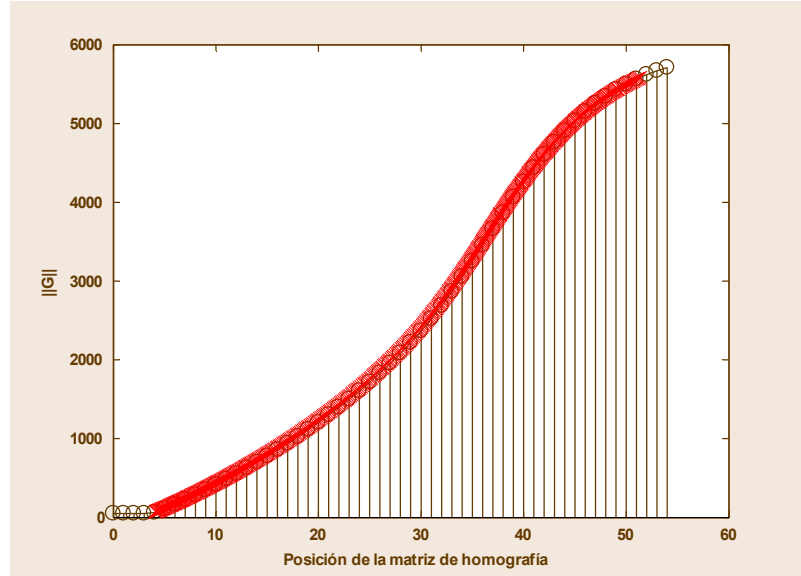


Fig. 3-13 Muestreo de la trayectoria deseada: (a) en el espacio cartesiano 3-D y (b) en la imagen

Para comprobar el correcto funcionamiento del sistema se va a probar el sistema propuesto de seguimiento intemporal de trayectorias en la imagen basado en la norma de la matriz de homografía 2-D para seguir la trayectoria mostrada en la Fig. 3-13.

La evolución en el espacio de las normas se representa en la Fig. 3-14. El sistema es capaz de realizar el seguimiento de la trayectoria deseada utilizando la técnica descrita del espacio de la norma de las matrices de homografía 2-D. La Fig. 3-14 muestra este espacio de normas. Para construirlo, primero se calcula el vector de matrices de homografías 2-D para la trayectoria en imagen mostrada en la Fig. 3-13.(b). A



partir de este vector,  $M$ , se consigue agrupar las características de la imagen en un mismo conjunto de información. La norma de cada matriz permite representar a todas las características mediante un único valor, evitando los problemas presentados en el control visual basado en flujo de movimiento descrito en el Apartado 3.3 de la presente Tesis, donde cada característica era controlada por separado.

Lo primero que se observa es que el seguimiento en imagen es el correcto, como se puede ver en la Fig. 3-15.(a). La evolución de las características en la imagen se ha superpuesto perfectamente a la evolución deseada. El comportamiento es también válido en el espacio 3-D (ver Fig. 3-15.(b)). Además, se mejora el comportamiento del seguimiento con flujo de movimiento, como se podrá comprobar en los resultados mostrados en el apartado siguiente donde se compara un sistema de control visual basado en flujo de movimiento con el sistema de seguimiento intemporal basado en control visual virtual que constituye una de las principales aportaciones de la Tesis.

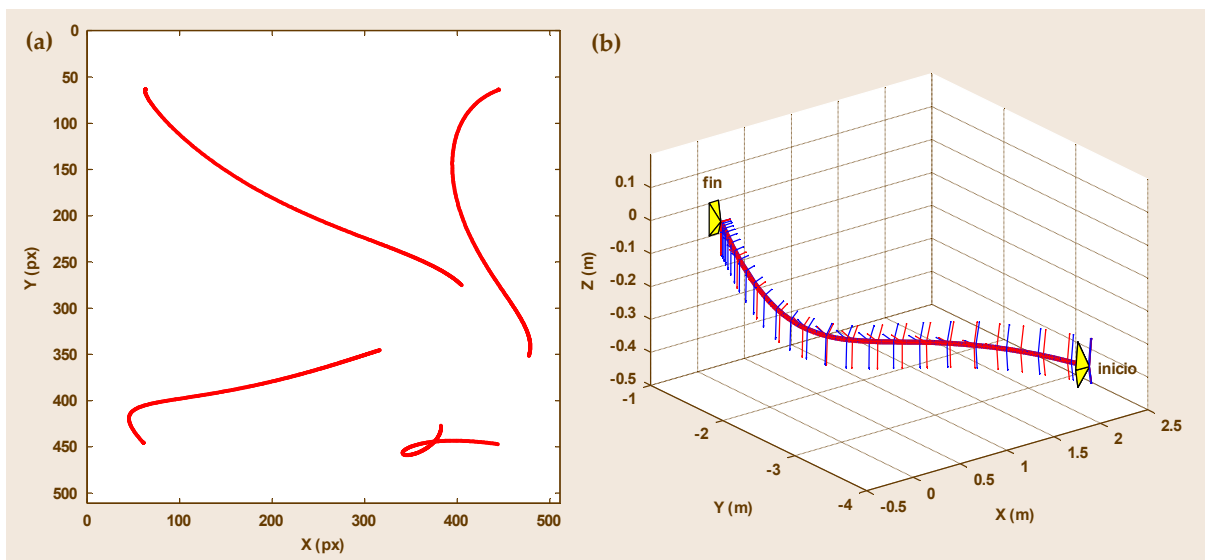


Fig. 3-15 Seguimiento con el método basado en la norma de la matriz de homografía 2-D: (a) Evolución de las características en la imagen (b) Evolución de la cámara en el espacio cartesiano 3-D



Sin embargo, como podremos comprobar en la Fig. 3-16, la velocidad no se ha conseguido controlar al valor deseado como se esperaba. Para el seguimiento se ha introducido una velocidad deseada de 2,75 mm/s. Sin embargo, en la Fig. 3-16.(b) se puede ver que no se consigue controlar el módulo de la velocidad a los 2,75 mm/s. Si bien en un principio parece que el sistema tiende a alcanzar esa velocidad, poco a poco ésta disminuye hasta que el sistema termina el seguimiento.

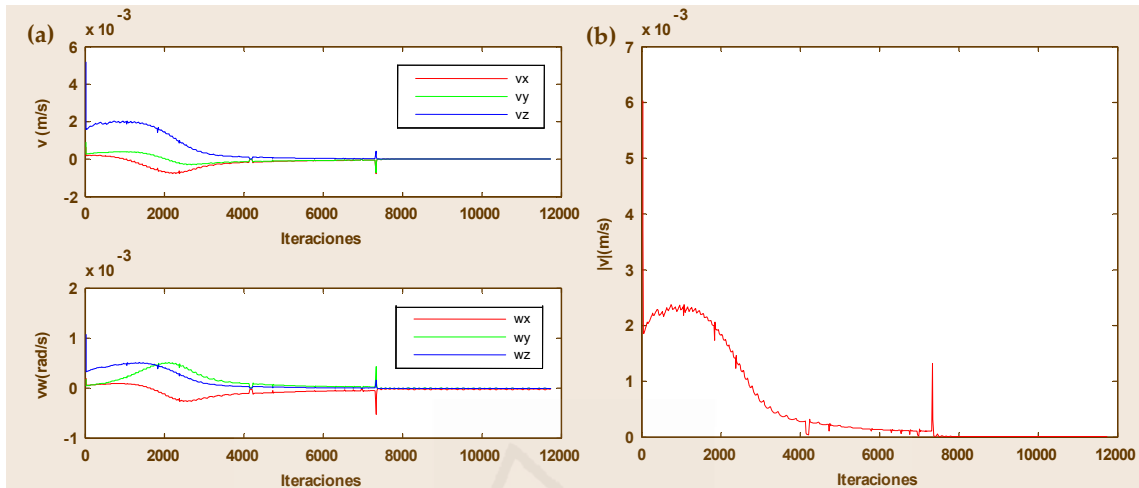


Fig. 3-16 Evolución de la velocidad enviada a la cámara tras el seguimiento con el método basado en la norma de la matriz de homografía 2-D: (a) velocidad lineal y rotacional (b) módulo de la velocidad

El comportamiento ha sido el correcto en el seguimiento en imagen y en el espacio 3-D, sin embargo no se ha conseguido mantener una velocidad constante durante el seguimiento. Dado que con el primer experimento no se ha conseguido el objetivo que se buscaba de controlar la velocidad durante el seguimiento, se prueba el sistema en el seguimiento de otra trayectoria en la imagen. La trayectoria probada ahora es la mostrada en la Fig. 3-17. Es una trayectoria mucho más oscilante que permitirá observar el comportamiento en el seguimiento ante trayectorias más complejas. Como se verá, el resultado no es adecuado, en cuanto a que no sólo no se consigue mantener una velocidad durante el seguimiento como ocurrió en la primera prueba realizada, sino que además, el seguimiento de la trayectoria se queda atascado en un momento dado, impidiendo así realizar la tarea prevista.

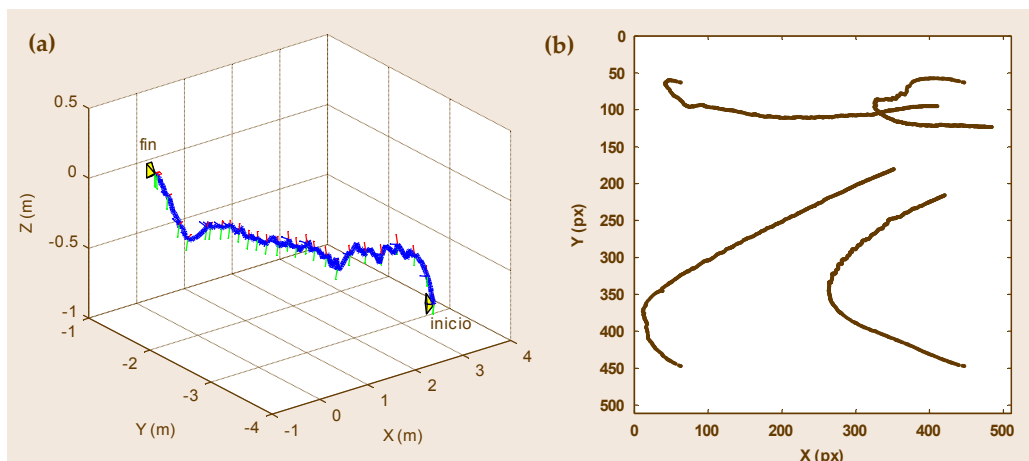


Fig. 3-17 Muestreo de la trayectoria deseada en el espacio cartesiano 3-D y en la imagen

El comportamiento del sistema al intentar seguir esta trayectoria en la imagen empeora. El sistema se para en mitad del seguimiento, obteniendo únicamente un seguimiento parcial de la trayectoria como se puede ver en la Fig. 3-18. Llegado a un punto del espacio de normas, el sistema no puede variar las características en la imagen y se queda parado. El sistema es incapaz de variar la velocidad para obtener variaciones en el espacio imagen de las características, con lo que no se puede continuar con el seguimiento. En la prueba anterior el resultado en imagen era satisfactorio, sin embargo, ahora se muestra que el método no es válido tal como está estructurado para el seguimiento de trayectorias en la imagen.

Sin embargo, hasta el momento de pararse, el sistema consigue realizar de forma precisa el seguimiento de la trayectoria en la imagen y en el espacio 3-D (como puede verse en la Fig. 3-19).

Por último, un análisis de la evolución del módulo de la velocidad durante el seguimiento permite concluir que el sistema no consigue controlar de forma precisa la velocidad del sistema. La Fig. 3-20 muestra esta evolución del módulo cuando se ejecuta el seguimiento con 1,75 y con 2,75 mm/s como módulo de la velocidad deseada. Sí se observa que el controlador consigue mantenerse en un entorno de la velocidad deseada, y que responde subiendo la velocidad cuando se aumenta la señal de control. Sin embargo, la oscilación excesiva hace que el método no termine de completar los objetivos marcados en un principio.

Las pruebas realizadas muestran que la aproximación mediante la norma de la matriz de homografía 2-D para el seguimiento intemporal de trayectorias en el espacio imagen, no resuelve los problemas encontrados en el control visual basado en flujo de movimiento. Si bien se consigue un seguimiento más preciso que en el flujo de movimiento (precisión que viene dada por el tratamiento conjunto de las características visuales), el sistema no asegura el seguimiento completo de la trayectoria. Además, no se ha conseguido mantener la velocidad constante que se desea durante el seguimiento. Por ello, en el siguiente apartado se presenta un método que sí resuelve finalmente los

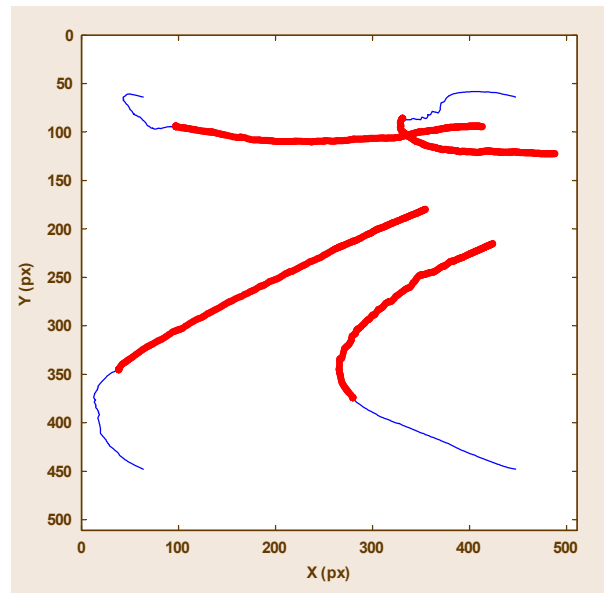


Fig. 3-18 Evolución de las características en la imagen tras el seguimiento con el método basado en la norma de la matriz de homografía 2-D

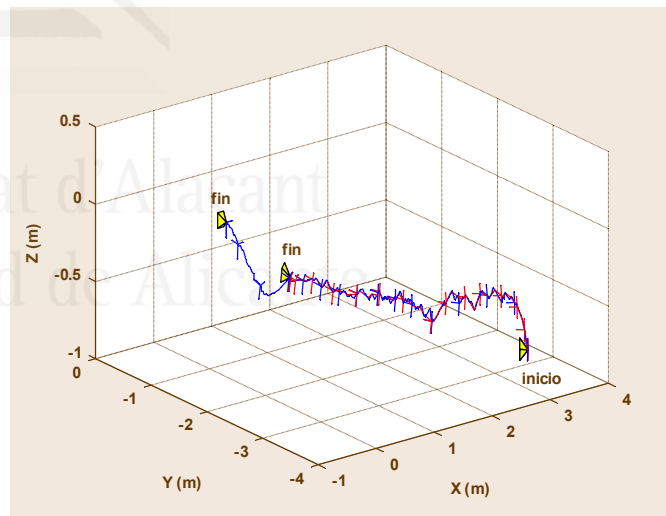


Fig. 3-19 Evolución de la cámara en el espacio cartesiano 3-D tras el seguimiento con el método basado en la norma de la matriz de homografía 2-D

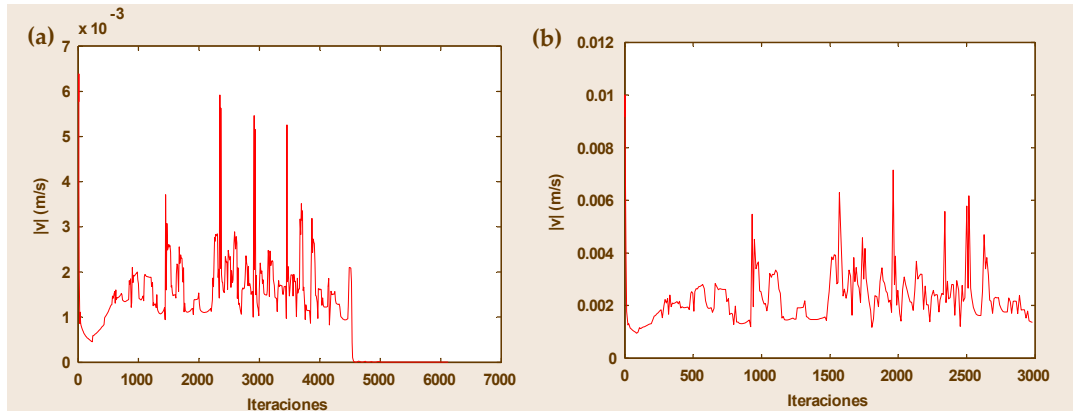


Fig. 3-20 Evolución del módulo de la velocidad enviada a la cámara tras el seguimiento con el método basado en la norma de la matriz de homografía 2-D: (a) velocidad deseada de 1,75 mm/s (b) velocidad deseada de 2,75 mm/s

problemas descritos, realizando de forma precisa el seguimiento de trayectorias previamente definidas en el espacio imagen, y manteniendo una velocidad constante durante este seguimiento.

### 3.5 Seguimiento intemporal basado en control visual virtual

En este apartado se describirá el método propuesto para el seguimiento intemporal de trayectorias en la imagen [GarcíaGJ-2007c, GarcíaGJ-2009d]. Este método propuesto basado en control visual virtual permite el seguimiento de trayectorias previamente muestreadas en el espacio imagen tal y como se describe en el Apartado 3.2 y constituye una de las principales aportaciones descritas en esta Tesis.

El control visual basado en imagen clásico no permite realizar el seguimiento de una trayectoria previamente definida en el espacio imagen. En una tarea de control visual basado en imagen, la evolución en el espacio imagen de una característica determinada tiende a seguir una línea recta. Por ello, es necesario definir un método que permita realizar el seguimiento en imagen de una trayectoria predefinida. Si se formula el seguimiento como una trayectoria en la imagen dependiente del tiempo [Mezouar-2002b, Mezouar-2003, Malis-2004b, Chesi-2005, Chesi-2007a, Chesi-2007b, Mezouar-2009], la configuración actual y la deseada se encontrarán siempre separadas por un intervalo de tiempo,  $\Delta t$ . Sin embargo, si un sistema de control visual basado en imagen es empleado para el seguimiento de trayectorias dependientes del tiempo, puede correr el riesgo de no seguir la trayectoria adecuada a costa de intentar mantener las restricciones temporales. Por otro lado, el hecho de que se alcancen unas características deseadas en un instante de tiempo determinado no garantiza el correcto seguimiento de la trayectoria. El método propuesto en este apartado tiene un comportamiento intemporal. El control visual basado en flujo de movimiento descrito en el Apartado 3.3 también tiene este comportamiento intemporal. Sin embargo, a diferencia de los sistemas de control visual basado en flujo de movimiento, el método que se propone en este apartado permite realizar el seguimiento de la trayectoria con una velocidad constante. Además, y tal y como se mostrará en el Apartado 3.7 de resultados, la trayectoria seguida por este método es mucho más precisa, aún cuando se requiera una velocidad de seguimiento mayor, lo que en el control visual basado en flujo de movimiento provocaría un resultado muy oscilante. El método propuesto trata de resolver los problemas

encontrados en el control visual basado en flujo de movimiento para obtener un método de seguimiento intemporal de trayectorias en el espacio imagen mejorado.

A continuación se detallan los pasos necesarios para realizar el seguimiento intemporal de una trayectoria previamente definida en el espacio imagen con el método propuesto basado en control visual virtual.

Tal como se describe en el Apartado 3.2, en primer lugar es necesario muestrear en el espacio imagen la trayectoria seguida por el robot en el espacio Cartesiano 3-D. Esta trayectoria muestreada será la trayectoria que ha de seguir el robot para completar la tarea. Los valores en la imagen de cada una de las  $M$  trayectorias (correspondientes a cada una de las  $M$  características) en los instantes  $k$  serán  $C_i = \{^k f_i / k \in 1..N\}$ . En cada instante  $k$  de la trayectoria deseada se tendrá de esta forma un vector de  $M$  características  $^k \mathbf{s} = \{^k f_i / i \in 1..M\}$ . Así, la trayectoria deseada quedará codificada en un vector de  $N$  posiciones para las  $M$  características  $T = \{^k \mathbf{s} / k \in 1..N\}$ .

Una vez obtenida la trayectoria deseada en la imagen  $T$ , el siguiente paso para el seguimiento de esta trayectoria será decidir qué tipo de seguimiento se quiere realizar. Atendiendo a la posición inicial de la cámara y dependiendo de la tarea a realizar, se puede desear un seguimiento completo de la trayectoria deseada (este sería el caso de corte de piezas) o simplemente acercarse desde esa posición inicial a la posición más cercana dentro de la trayectoria deseada para, a partir de ese momento, seguir la trayectoria hasta el final.

El algoritmo de seguimiento intemporal de trayectorias descrito en el presente apartado, recibirá el dato de cuál es la posición inicial dentro de la trayectoria deseada  $T$ . El algoritmo de búsqueda de la posición inicial en la trayectoria deseada a partir de la posición inicial de la cámara se puede ver esquematizado en la Fig. 3-21. Para obtener este dato, se requiere conocer el tipo de seguimiento a desarrollar. En el caso que se quiera realizar el seguimiento completo de la trayectoria deseada independientemente de la posición inicial de la cámara, se pasará al algoritmo de seguimiento la primera posición. Si lo que se desea es obtener la posición más cercana a la trayectoria deseada, se tendrá que realizar una búsqueda de esta posición. Para conseguir esta posición, se busca entre todas las posibles posiciones de  $T$  aquella configuración  $^k \mathbf{s}$  que permita llegar desde la posición inicial de la cámara a ella con la mínima velocidad.

Considerando un sistema de control visual basado en imagen, la velocidad a aplicar al robot respecto al sistema de referencia de la cámara será:

$$^k \mathbf{v} = -\lambda \cdot \hat{\mathbf{L}}_s^+ \cdot \mathbf{e}_s, \quad (3.17)$$

donde  $\lambda$  es la ganancia del controlador proporcional;  $\hat{\mathbf{L}}_s^+$  es la pseudoinversa de la matriz de interacción,  $\mathbf{e}_f = \mathbf{s} - ^k \mathbf{s}$  y  $\mathbf{s} = [f_1, f_2, \dots, f_M]^T$  son las características extraídas en la imagen.

A continuación se describe el algoritmo que permite realizar el seguimiento intemporal de trayectorias en el espacio imagen.

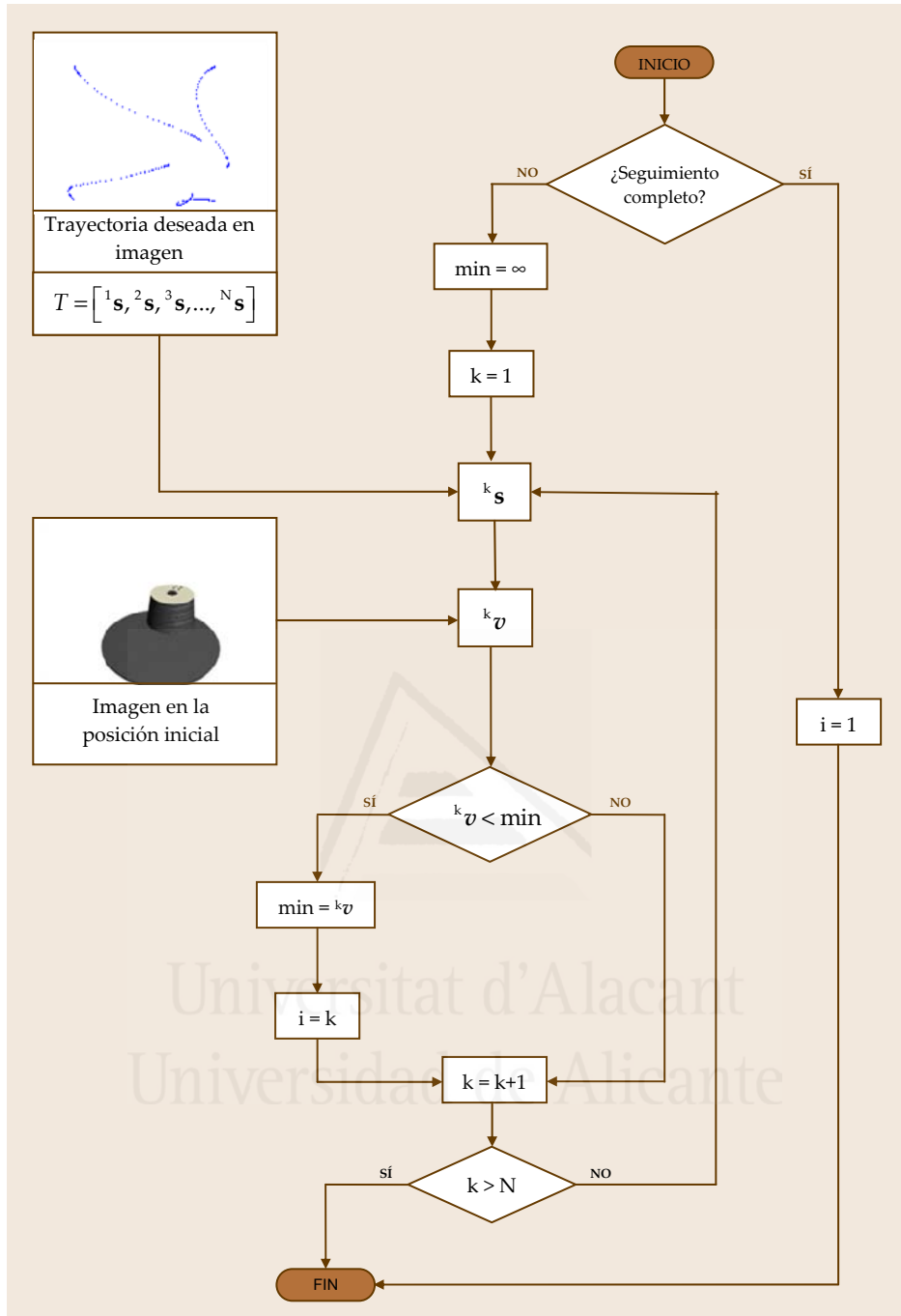


Fig. 3-21 Esquema del algoritmo de búsqueda de la posición inicial dentro de la trayectoria deseada

Tras obtener la posición inicial en la trayectoria deseada  $T$ , se comienza la búsqueda dentro de esa trayectoria de la configuración  ${}^k s$  que está lo suficientemente alejada de la posición actual de la cámara como para enviar una velocidad al robot superior a la deseada. Se fija como  $|v_d|$  el módulo de la velocidad deseada durante el seguimiento de la trayectoria. A partir de la posición inicial calculada según el algoritmo descrito en la Fig. 3-21 se itera en busca de la configuración  ${}^k s$  que, a partir de (3.17) (y tomando  $s$  de la imagen captada por la cámara en la posición actual), permita superar en módulo la velocidad deseada (ver Fig. 3-22).

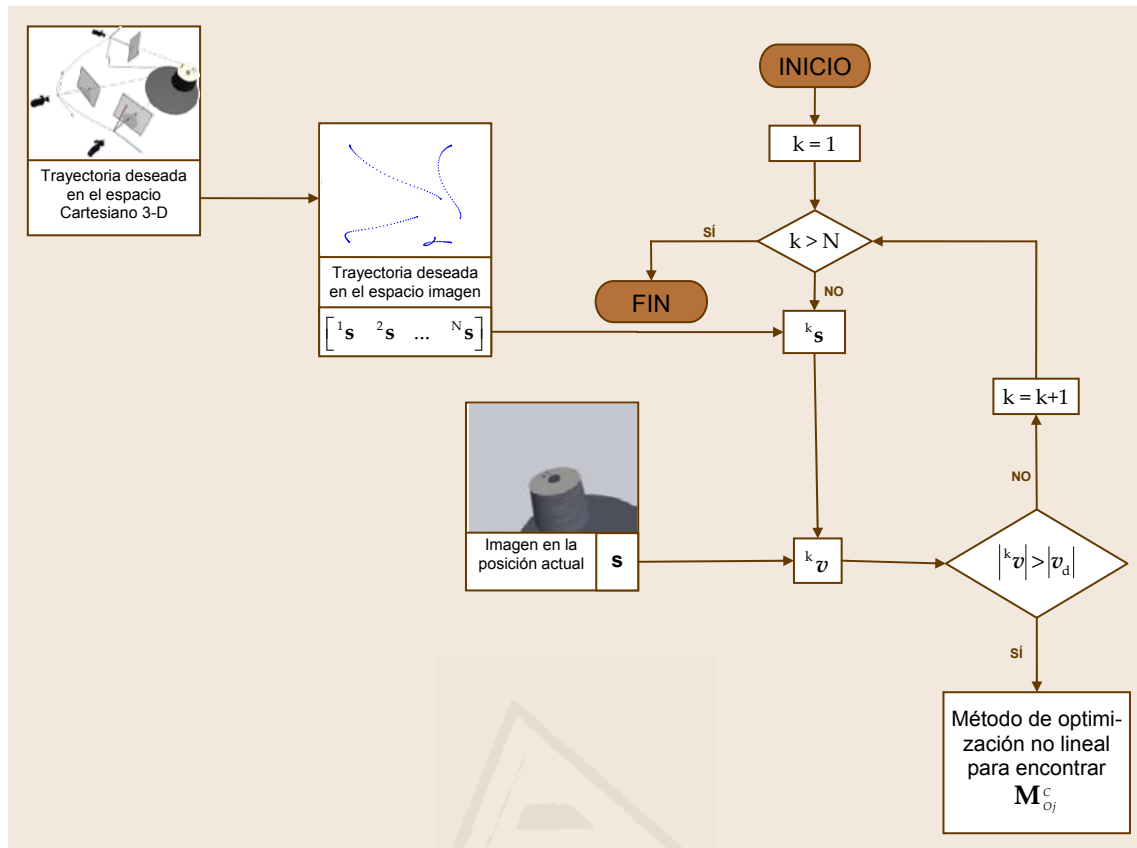


Fig. 3-22 Esquema del algoritmo de búsqueda del primer conjunto de características dentro de la trayectoria deseada que excede la velocidad requerida

Si se indicara este  $s^k$  como referencia para la ley de control visual definida en (3.17), se tendría un controlador que permitiría realizar un seguimiento intemporal de la trayectoria deseada. Esto es así porque la posición de las características deseadas no depende del tiempo, sino de la ubicación de las actuales. La información de la trayectoria a seguir está codificada en la imagen, y por tanto, no depende del tiempo. El resultado de realizar el seguimiento con este controlador no sería, sin embargo, satisfactorio. El problema está en que no se mantendría la velocidad durante el seguimiento de la trayectoria, ya que las distintas posiciones muestreadas de la trayectoria  $T$  no están separadas la misma distancia ni en imagen ni en 3-D.

Para conseguir mantener el módulo de la velocidad durante el seguimiento se necesita encontrar la posición 3-D entre dos muestras de la trayectoria deseada,  $T$ , que, al aplicar la ley de control visual basado en imagen clásica (considerando  $s_d$  las características proyectadas en la imagen desde esta posición), permita obtener exactamente esa velocidad deseada. Para ello, se introduce un bloque más al algoritmo, que se encargará de obtener las características deseadas en la imagen para mantener constante el módulo de la velocidad. La Fig. 3-23 resume el proceso seguido para obtener las características deseadas a partir de la interpolación entre dos muestras de la trayectoria.

El problema que debe resolver este nuevo bloque es el de obtener una interpolación válida en el espacio Cartesiano 3-D entre dos posiciones muestreadas de la trayectoria deseada. Dado que se tiene únicamente un muestreo en imagen de la trayectoria deseada, se necesita reconstruir de alguna manera la trayectoria entre dos muestras en



el espacio 3-D. Si se interpolara en la imagen, no se estaría asegurando un movimiento correcto del robot en 3-D. El método propuesto parte de aplicar control visual virtual en cada una de las muestras de la trayectoria deseada entre las que se quiere interpolar. De esta forma se consigue obtener los parámetros extrínsecos de la cámara en cada una de las posiciones. Con los parámetros extrínsecos se tiene información 3-D de la posición de la cámara, con lo que se puede generar una trayectoria recta en el espacio Cartesiano entre las dos posiciones de la trayectoria.

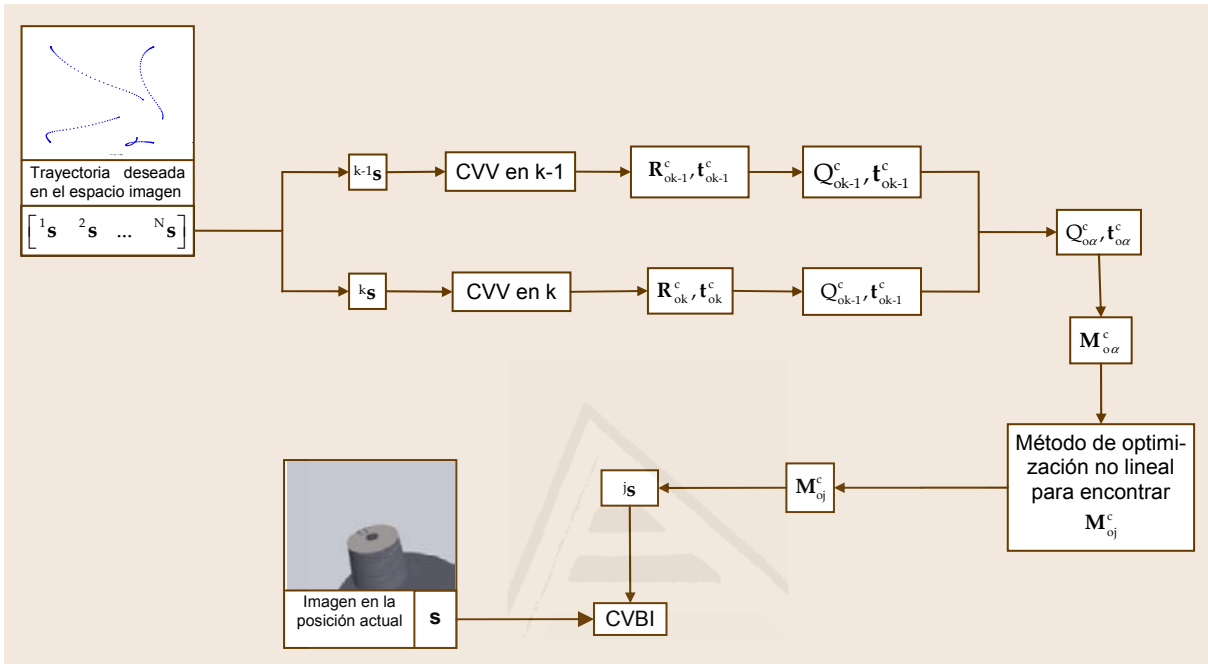


Fig. 3-23 Esquema del algoritmo de interpolación de la trayectoria en 3-D para obtener el conjunto de características visuales que aseguran la velocidad deseada durante el seguimiento de la trayectoria

Tal como se describe en el capítulo 2, empleando control visual virtual se pueden obtener los parámetros extrínsecos de la cámara a partir de una imagen captada por la cámara. En el vector  $^k\mathbf{s}$  se tiene codificada la posición de las características en la posición  $k$  de la trayectoria deseada  $T$ . A partir de este vector  $^k\mathbf{s}$  se reconstruye la imagen que el control visual virtual utiliza en su ley de control para, mediante iteraciones, llegar a obtener los parámetros extrínsecos de la cámara que ha captado esta imagen.

Los parámetros extrínsecos de la cámara  $\mathbf{M}_O^C$  almacenan la rotación  $\mathbf{R}$  y la traslación  $\mathbf{t}$  entre el sistema de referencia de la cámara y el sistema de referencia del objeto. Para interpolar entre dos posiciones contiguas ( $k-1$  y  $k$ ) de la trayectoria deseada  $T$ , se pueden separar las dos componentes, por un lado la traslación y por otro la rotación. Aplicando control visual virtual en  $k-1$  y en  $k$ , se obtendrán las matrices de rotación  $^{k-1}\mathbf{R}$  y  $^k\mathbf{R}$ . También se obtendrán los vectores de traslación  $^{k-1}\mathbf{t}$  y  $^k\mathbf{t}$ .

Para interpolar según una línea recta en el espacio Cartesiano 3-D entre las dos posiciones, basta con seguir la siguiente ecuación:

$${}^\alpha\mathbf{t} = \alpha \cdot ({}^k\mathbf{t} - {}^{k-1}\mathbf{t}), 0 \leq \alpha \leq 1. \tag{3.18}$$

La interpolación de la orientación no es tan trivial. Tal como se describe en el Anexo 1, la interpolación mediante cuaternios sí que permite resolver los problemas

que se presentan con los ángulos de Euler (presencia de singularidades), o la matriz de rotación (que necesita de 9 parámetros para su definición en vez de los 3 que se requieren para obtener los ángulos de Euler). Los cuaternios ofrecen una mayor eficiencia computacional que los demás métodos de representación de la orientación. En el Anexo 1 se describen las principales herramientas matemáticas para conseguir generar una trayectoria interpolada a partir de las matrices de rotación  ${}^{k-1}\mathbf{R}$  y  ${}^k\mathbf{R}$  obtenidas en el paso anterior con el control visual virtual. Para ello, a partir de (A1.5) se generan los cuaternios  ${}^{k-1}\mathbf{Q}$  y  ${}^k\mathbf{Q}$  correspondientes a  ${}^{k-1}\mathbf{R}$  y  ${}^k\mathbf{R}$ .

En (A1.13) se define la forma de interpolar la orientación entre dos orientaciones definidas con cuaternios [Shoemake-1985]. Aplicando esta ecuación se puede calcular cualquier orientación intermedia entre las dos orientaciones dadas expresada según el cuaternio  ${}^\alpha\mathbf{Q}$ . El último paso será reconstruir la matriz de rotación  ${}^\alpha\mathbf{R}$  a partir de  ${}^\alpha\mathbf{Q}$  aplicando la ecuación (A1.3).

Con los datos obtenidos hasta ahora, dependiendo del valor de  $\alpha$ , se podrá obtener una configuración de la cámara válida en el espacio Cartesiano 3-D. El siguiente objetivo es generar posiciones en imagen de las características  ${}^\alpha\mathbf{s}$ , tal y como se observarían por la cámara desde cualquier posición  $\alpha$  de la trayectoria interpolada. Para ello, se reconstruyen los parámetros extrínsecos de la cámara a lo largo de la trayectoria interpolada en 3-D a partir de  ${}^\alpha\mathbf{R}$  y  ${}^\alpha\mathbf{t}$ .

$$\mathbf{M}_O^C(\alpha) = \begin{pmatrix} {}^\alpha\mathbf{R}_{3 \times 3} & {}^\alpha\mathbf{t}_{3 \times 1} \\ 0_{1 \times 3} & 1_{1 \times 1} \end{pmatrix}. \quad (3.19)$$

El método para retroproyectar las características en la imagen es el mismo que se usa en control visual virtual, es decir, se parte de la posición de la característica respecto al sistema de referencia del objeto  $\mathbf{x}^O$  y de los parámetros extrínsecos de la cámara en la trayectoria interpolada  $\mathbf{M}_O^C(\alpha)$ .

$$\mathbf{x}^C(\alpha) = \mathbf{M}_O^C(\alpha)\mathbf{x}^O. \quad (3.20)$$

Siendo  $\mathbf{x}^C(\alpha) = (X(\alpha), Y(\alpha), Z(\alpha))$ , la característica 2-D asociada se obtiene de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} x(\alpha) &= \frac{X(\alpha)}{Z(\alpha)}, \\ y(\alpha) &= \frac{Y(\alpha)}{Z(\alpha)}. \end{aligned} \quad (3.21)$$

Finalmente se obtiene el punto en el plano imagen a partir de los parámetros intrínsecos y de este punto 2-D métrico.

$$\begin{aligned} u(\alpha) &= u_0 + f_u x(\alpha), \\ v(\alpha) &= v_0 + f_v y(\alpha). \end{aligned} \quad (3.22)$$

Esta última ecuación permite obtener las características tal como se verían desde la cámara situada a lo largo de la trayectoria que se ha interpolado entre las dos posicio-

nes consecutivas de la trayectoria deseada en imagen. Siguiendo (3.22) se construye el vector de características  $\mathbf{s}(\alpha)$  a partir del cual se va a buscar la configuración,  $\mathbf{s}$ , que permite mantener constante el módulo de la velocidad en el seguimiento de la trayectoria deseada.

Para encontrar el punto exacto  $\mathbf{j}$  en el que las características en la imagen (obtenidas a partir de esta trayectoria interpolada) aseguren la velocidad deseada, se utiliza un método de optimización no lineal basado en mínimos cuadrados (ver Anexo 3). Para ello, es necesario minimizar el error  $\mathbf{e}_o = \|\mu_c(\alpha) - v_d\|$ , donde:

$$\mu_c(\alpha) = -\lambda \hat{\mathbf{L}}_f^+ (\mathbf{s} - \mathbf{s}^*(\alpha)), \quad (3.23)$$

y

$$\mathbf{s}^*(\alpha) = pr_{\xi}(\mathbf{M}_O^C(\alpha) \mathbf{P}^O), \quad (3.24)$$

donde  $\mathbf{P}^O$  es el conjunto de posiciones del objeto consideradas y  $pr_{\xi}$  representa el modelo de proyección de perspectiva de acuerdo a los parámetros intrínsecos,  $\xi$ .

Una vez que se obtiene el valor de  $\alpha$  que minimiza  $\mathbf{e}_o$ , el conjunto de características  $\mathbf{s}$  será igual a  $\mathbf{s}^*(\alpha)$ .

### 3.5.1 Estabilidad del método

No tiene sentido hablar de estabilidad en el sentido de Lyapunov para el caso del método de seguimiento de trayectorias, ya que no se tiene un punto de equilibrio a partir del cual estudiar la estabilidad. Los únicos estudios realizados hasta la fecha sobre la estabilidad tratan sobre trayectorias muy concretas para robots móviles. En [Coulaud-2006] se realiza el estudio de estabilidad de un sistema de guiado de un robot móvil que sigue trayectorias circulares. No se demuestra el concepto de estabilidad asintótica en el sentido de Lyapunov, sino más bien la existencia de trayectorias de equilibrio en situaciones muy particulares. Coulaud et al. definen el equilibrio como el estado en que el eje trasero del robot gira en la trayectoria circular predefinida. Esta definición de estabilidad no puede aplicarse a trayectorias más complejas. Sólo recientemente, en [Cherubini-2008] se estudia el concepto de estabilidad definido por Lyapunov en un sistema de seguimiento de trayectorias con robots móviles. El esquema de control descrito permite a un robot móvil con una cámara montada en su parte delantera seguir una línea dibujada en el suelo. El esquema de control propuesto se define sobre un conjunto de características que permanece constante a lo largo de la tarea de seguimiento. Las características elegidas son las coordenadas en imagen del primer punto de la trayectoria y el ángulo formado por la tangente a la trayectoria en ese punto y el eje Y de la imagen. El seguimiento se define de forma que la coordenada X del punto se mantenga en el centro de la imagen, la coordenada Y sea la correspondiente a la última fila de la imagen, y el ángulo entre la tangente y el eje Y sea 0. El estudio de la estabilidad asintótica en el sentido de Lyapunov se realiza sobre la base de este punto de equilibrio formado por esos tres valores. El método propuesto de seguimiento de trayectorias no tiene una referencia constante como en el caso anterior descrito en [Cherubini-2008]. La referencia varía en función de la posición actual y de la velocidad

deseada. Sin embargo, sí se puede estudiar la estabilidad de manera estática en una iteración del bucle de control del seguimiento. Y en este caso, tal como se ha descrito en el Apartado 2.2.4, se tiene una estabilidad asintótica local.

Para el método de seguimiento intemporal de trayectorias en el espacio imagen basado en control visual virtual, la ley de control que proporciona las velocidades del extremo del robot en función del error en la imagen es la misma que la descrita en (2.36). La diferencia está en el cálculo del error  $\mathbf{e}$ . Para el método de seguimiento de trayectorias, las características deseadas  $\mathbf{s}^*$  no son constantes, sino que varían para mantener constante la velocidad del seguimiento. El método propuesto de seguimiento de trayectorias en la imagen basado en control visual virtual permite obtener en función de las características actuales la posición de las características en la imagen,  $\mathbf{s}_j$ , que permitirían mantener esta velocidad deseada. A partir de aquí, se aplica la ley de control visual basado en imagen clásica, que como se ha demostrado en el Apartado 2.2.4 es localmente estable. Por lo tanto, se puede concluir que el sistema propuesto de seguimiento intemporal de trayectorias basado en control visual virtual es asintóticamente estable de manera local.

Dado que en un sistema de seguimiento de trayectorias, las características actuales y las deseadas están muy próximas entre sí, la posición de la cámara en la posición actual,  $\mathbf{p}$ , estará (con mayor probabilidad que en un control visual basado en imagen clásico) dentro del entorno de  $\mathbf{p}^*$  que asegura la estabilidad del sistema.

## 3.6 Implementación

Antes de exponer los distintos resultados obtenidos, en este apartado se describen brevemente algunos aspectos relativos a la implementación del sistema de seguimiento intemporal de trayectorias en la imagen basado en control visual virtual desarrollado. Para ello, en primer lugar se describe el sistema de simulación software desarrollado para posteriormente mostrar los distintos componentes de la arquitectura del sistema donde se ha evaluado el sistema de seguimiento intemporal de trayectorias en la imagen basado en control visual virtual.

### 3.6.1 Sistema de simulación

Como base para las simulaciones desarrolladas y la posterior implementación se ha empleado la toolbox de control visual para MATLAB (cabe reseñar que, aunque las simulaciones se han desarrollado en MATLAB, la posterior implementación en un sistema real se ha llevado a cabo tras la conversión del código a C, lo que garantiza unos retardos menores y una mayor optimización del código).

### 3.6.2 Arquitectura del sistema

En la Fig. 3-24 se muestra la arquitectura del sistema empleada para la realización de las pruebas de laboratorio.

Las características de cada uno de los dispositivos empleados son:

- *Sistema de visión artificial:* La captura de imágenes se realiza desde el extremo del robot empleando una cámara PHOTONFOCUS MV-D752-160-CL-8. Esta cámara

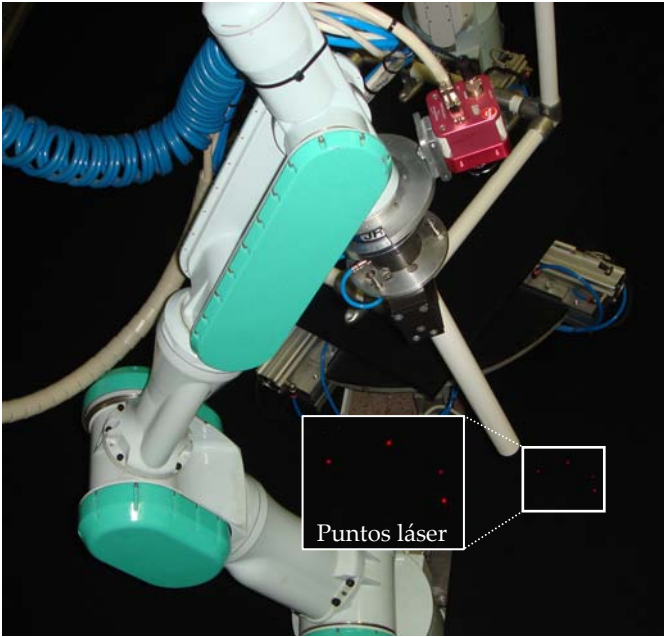


Fig. 3-24 Principales componentes de la arquitectura del sistema

está conectada a una tarjeta Coreco X64CL-Pro que permite realizar tareas de captura y procesamiento de imágenes. La cámara es capaz de adquirir y procesar imágenes de 320x240 a una velocidad de 100 frames/s.

- *Sistema robot:* El robot empleado ha sido un Mitsubishi PA-10 con 7 grados de libertad.
- *Objetivo:* El objeto seguido se trata de un patrón creado con un patrón de láser, con cuatro marcas que serán las que se extraerán durante el seguimiento.

## 3.7 Resultados

En este apartado se van a describir las distintas pruebas realizadas que muestran el correcto funcionamiento del sistema. Para ello, en primer lugar se muestran los resultados obtenidos en la simulación para posteriormente exponer los resultados correspondientes al utilizar la arquitectura descrita en el Apartado 3.6.2.

### 3.7.1 Resultados de simulación

Para evaluar el sistema propuesto y compararlo con otros sistemas de seguimiento de trayectorias en el espacio imagen descritos en el presente capítulo, se presentan a continuación los resultados obtenidos en el seguimiento de distintas trayectorias. Estas trayectorias permiten comprobar la validez del sistema propuesto, destacando las mejoras obtenidas en cualquier tipo de trayectoria respecto a métodos previos.

#### 3.7.1.1 Trayectoria con las características iniciales en la trayectoria deseada.

Este primer experimento presenta un bucle en el espacio imagen para la trayectoria de una de las características. La presencia de un bucle en alguna de las trayectorias de las características provocaba ciertos problemas para el control visual basado en flujo de movimiento descrito en la Sección 3.3. La Fig. 3-25 muestra la trayectoria 3-D que se desea seguir por la cámara situada en el extremo del robot, así como la trayectoria muestreada en el espacio imagen,  $T$ .

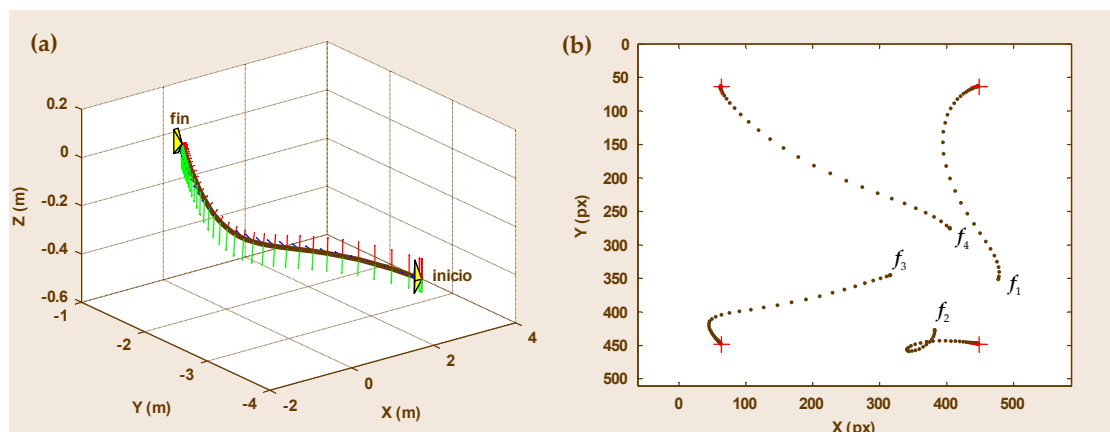


Fig. 3-25 Muestreo de la trayectoria deseada: (a) en el espacio cartesiano 3-D y (b) en la imagen

Si se aplicara la técnica del control visual clásico, nunca podría seguirse la trayectoria deseada. El control visual clásico permite obtener en el espacio imagen trayectorias en línea recta entre la configuración inicial y la final. Esta particularidad impide reconstruir la trayectoria deseada también en el espacio euclídeo. En la Fig. 3-26 se muestra en azul la trayectoria deseada, tanto en el espacio 3-D como en el espacio imagen, mientras que en rojo se representa la trayectoria en ambos planos tras ejecutar control visual basado en imagen clásico. Se puede observar en la Fig. 3-26 que la trayectoria del extremo del robot en el espacio 3-D no se aproxima a la deseada. Lo mismo ocurre en el espacio imagen. Para conseguir el correcto seguimiento de la trayectoria deseada se emplea la aproximación descrita en el Apartado 3.5. En la Fig. 3-27 se muestra que el seguimiento con el método propuesto es completamente satisfactorio en el plano imagen.

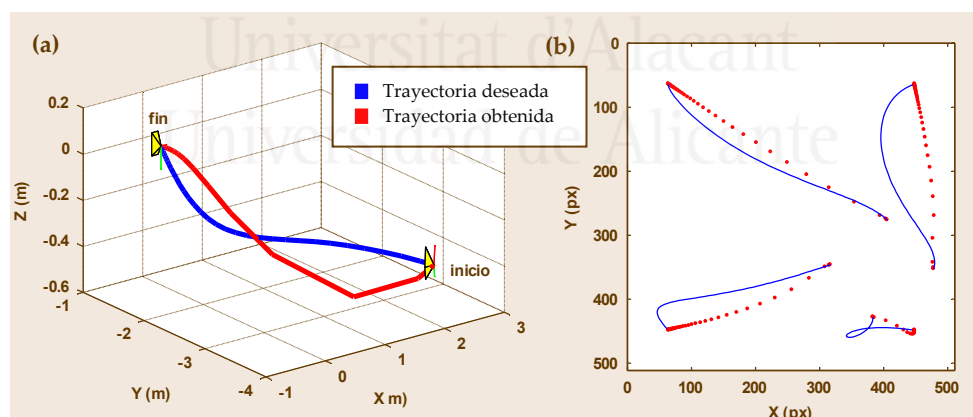


Fig. 3-26 Muestreo de la trayectoria deseada: (a) en el espacio cartesiano 3-D y (b) en la imagen

De nuevo en la Fig. 3-27 se ha representado en azul la trayectoria deseada, y en rojo la trayectoria seguida con el método propuesto de seguimiento. La gráfica representada en la Fig. 3-27 se ha obtenido controlando el módulo de la velocidad a 10 mm/s. En posteriores secciones se mostrarán distintas gráficas indicando la influencia de este parámetro en el seguimiento de la trayectoria. Se observa en la Fig. 3-27.(b) que el seguimiento con esta velocidad hace que se superpongan totalmente la trayectoria deseada y la real obtenida con el método propuesto de control visual basado en control visual virtual.



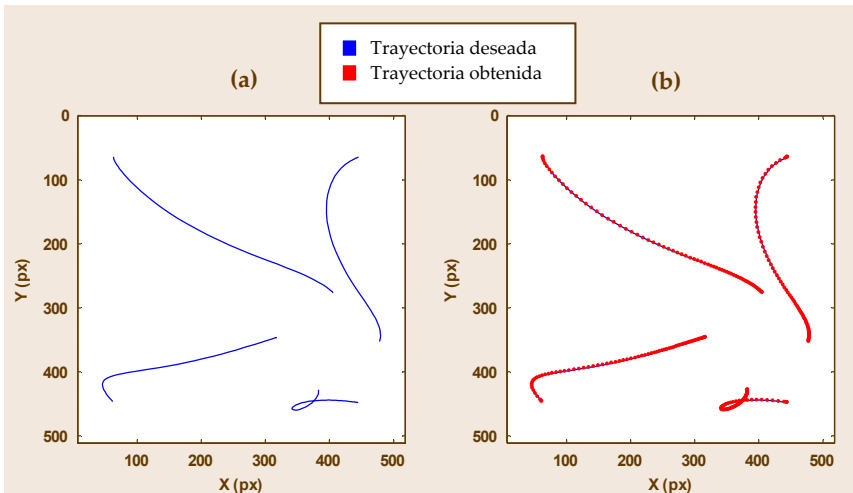


Fig. 3-27 (a) Trayectoria deseada en la imagen. (b) Comparativa entre la trayectoria deseada y la obtenida con el método de seguimiento propuesto

A pesar de que en la imagen el seguimiento es correcto, se debe demostrar también que se consigue el seguimiento de la trayectoria en el espacio cartesiano 3-D con la estrategia propuesta. Para comprobar esto, en la Fig. 3-28 se muestran distintas vistas de la trayectoria 3-D descrita en este experimento. En estas figuras se muestra la evolución

del sistema de coordenadas de la cámara ubicada en el extremo del robot durante todo el seguimiento (se representa la trayectoria deseada y la real obtenida al aplicar el método propuesto). Puede observarse que se realiza un correcto seguimiento de la trayectoria en el espacio 3-D.

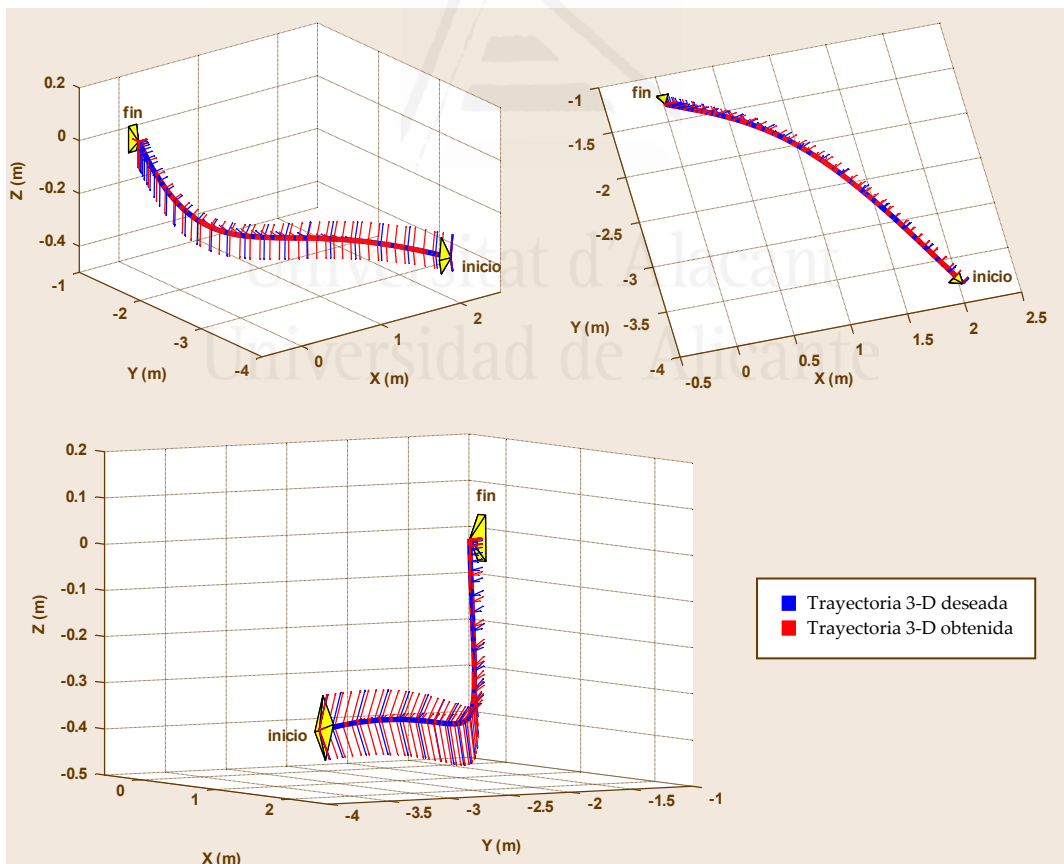


Fig. 3-28 Distintas vistas de la trayectoria descrita por la cámara en el espacio Cartesiano 3-D

Si se estudia la evolución del error en la imagen a lo largo del seguimiento de la trayectoria (Fig. 3-29) se observa que éste no supera los 15 píxeles en el método propuesto. La evolución del error en el control visual basado en imagen clásico es exponencial. Es evidente que en la estrategia propuesta para el seguimiento de la trayectoria

no se obtiene una evolución exponencial del error, ya que la referencia es variable. El método trata de mantener constante el módulo de la velocidad, para lo cual se envía al controlador una referencia distinta en cada iteración.

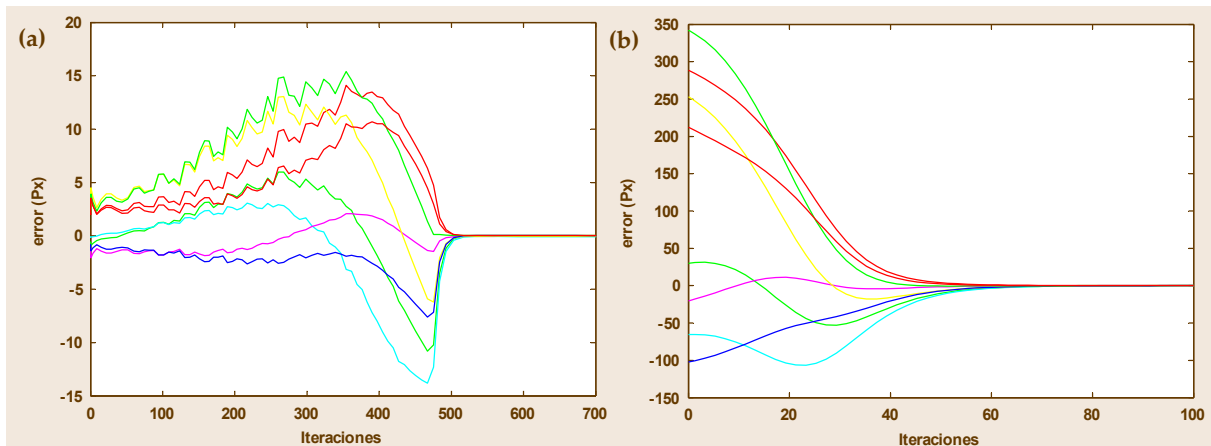


Fig. 3-29 Error en la imagen: (a) Empleando el método propuesto (b) Empleando control visual basado en imagen

Para terminar de analizar los datos obtenidos durante el seguimiento de esta trayectoria, en la Fig. 3-30 se representan las velocidades traslacionales y rotacionales enviadas al extremo del robot para los casos del método propuesto y para el control visual basado en imagen. En la Fig. 3-30.(a) se observa que el módulo de la velocidad traslacional se mantiene tal y como se ha comentado en torno a 10 mm/s. Se aprecia en la Fig. 3-30.(b) que las velocidades con el control visual basado en imagen son mayores, y que en ningún momento se mantienen controladas, pudiendo sobrepasar la velocidad máxima del robot. En posteriores secciones se presentarán gráficas que muestran la flexibilidad del método propuesto para adaptarse a la velocidad requerida, obteniendo aún así muy buenas prestaciones tanto en el seguimiento en el plano imagen como en el plano cartesiano 3-D.

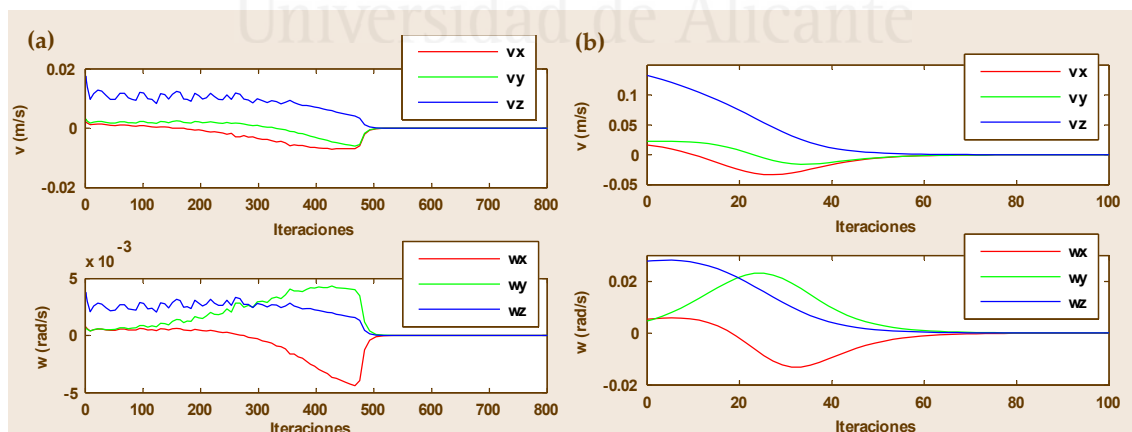


Fig. 3-30 Velocidades aplicadas al robot durante el seguimiento de la trayectoria: (a) Empleando el método propuesto (b) Empleando control visual basado en imagen

El método propuesto ha funcionado de forma correcta para esta primera trayectoria. En la siguiente prueba se va a introducir una modificación en la posición inicial de la cámara. De esta forma, la posición inicial de las características observadas no será igual que la posición inicial de las características en la trayectoria deseada.

### 3.7.1.2 Trayectoria con las características iniciales fuera de la trayectoria deseada

En la imagen captada por el sistema de visión al inicio de este experimento no se

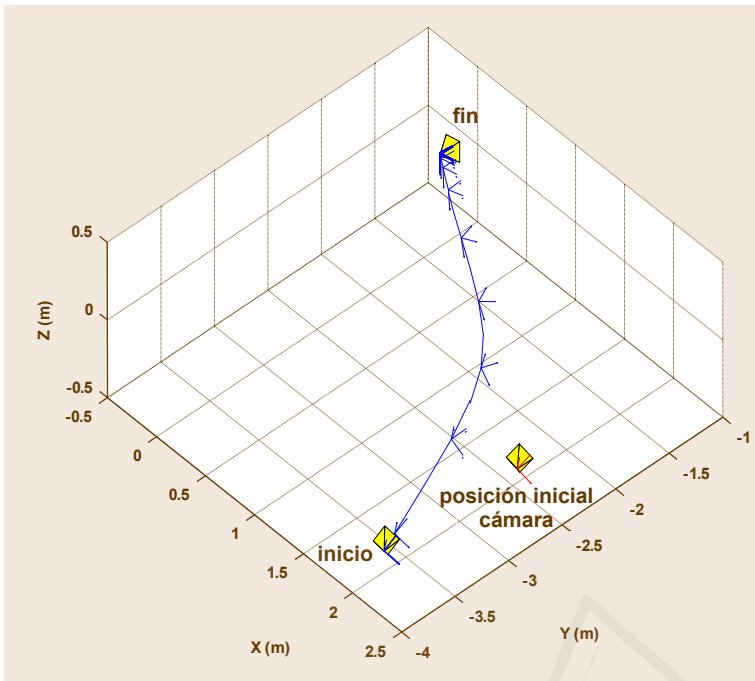


Fig. 3-31 Posición inicial de la cámara fuera de la trayectoria en el espacio Cartesiano 3-D

observan las características correspondientes a la posición inicial de la trayectoria deseada. De hecho, la localización inicial del robot en el espacio Cartesiano 3-D no se corresponderá con ninguna de las representadas en el conjunto  $\tau = \{^k\gamma / k \in 1..N\}$  (trayectoria deseada del robot), como se puede apreciar en la Fig. 3-31.

Esta situación podría resolverse de dos formas distintas. En una primera aproximación se guiaría al robot hacia la posición inicial de la trayectoria deseada. Esta opción es la idónea para resolver el problema presentado en aquellas ocasiones en las que

es absolutamente indispensable el seguimiento total de la trayectoria. Otra alternativa sería llevar al robot a una configuración  $^k\gamma$  adecuada a partir de la cual pueda extraerse unas características en la imagen  $^k\mathbf{s} = \{^k f_i / i \in 1..M\}$  que se encuentren en la trayectoria deseada y, a su vez, conformen una configuración deseada de las características en la imagen.

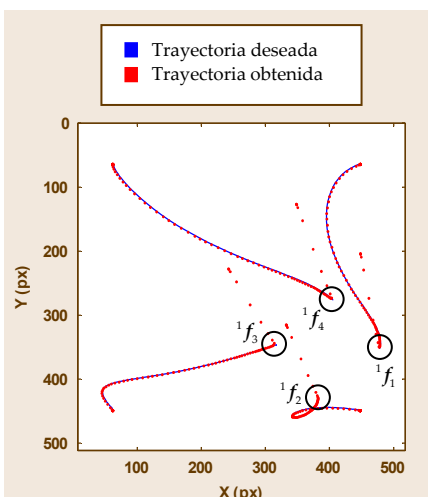


Fig. 3-32 Comparativa entre la trayectoria real y la trayectoria deseada para la aproximación de seguimiento completo de la trayectoria. (La posición inicial no se encuentra en la trayectoria deseada)

El primer caso se resuelve de forma natural por el método propuesto, dado que el sistema obtendrá una velocidad excesiva en la primera iteración, lo que interpolará una configuración  $^k\mathbf{s}$  muy cercana a la primera de la trayectoria. El resultado final será la ejecución de control visual basado en imagen con aproximadamente la primera configuración  $^1\mathbf{s} = \{^1 f_i / i \in 1..M\}$  como posición final, para luego seguir la trayectoria deseada de forma completa. En la Fig. 3-32 se muestra esta situación descrita para el plano imagen.

En imagen se sigue correctamente el total de la trayectoria con esta aproximación. En el espacio cartesiano 3-D el resultado es también el esperado. En la Fig. 3-33 se observa que la cámara evoluciona desde la posición inicial hasta la posición inicial de la trayectoria deseada, momento desde el que ya se efectúa de forma correcta el seguimiento de la trayectoria.

Para abordar con éxito la segunda aproximación se debe recorrer en un principio la trayectoria deseada. Si las características iniciales,  $^{inic}s$ , no se encuentran situadas a lo largo de la trayectoria deseada, el sistema tendrá que converger hacia la configuración, que asegure la velocidad mínima desde la posición inicial de la cámara. Cuando se han evaluado todas las configuraciones de la trayectoria deseada, se tendrá la configuración  $^ks$ , más cercana a la configuración actual  $^{inic}s$ . Una vez determinada esta configuración  $^ks$ , el sistema convergerá hacia ella (empleando un sistema de control basado en imagen), consecuentemente, la trayectoria descrita desde  $^{inic}s$  hasta  $^ks$  no se encontrará en la trayectoria deseada (ni en la imagen ni en el espacio 3-D), sin embargo, una vez que se haya alcanzado  $^ks$ , se puede asegurar que se obtendrá una localización  $^k\gamma$  deseada para el robot en el espacio 3-D.

Tras la determinación de la configuración de control más cercana y la convergencia hacia ella se aplica lo desarrollado a lo largo del capítulo ya que, una vez alcanzada una localización deseada del robot  $^k\gamma$ , se tiene una situación como la descrita para el caso 1 (características iniciales en la trayectoria deseada).

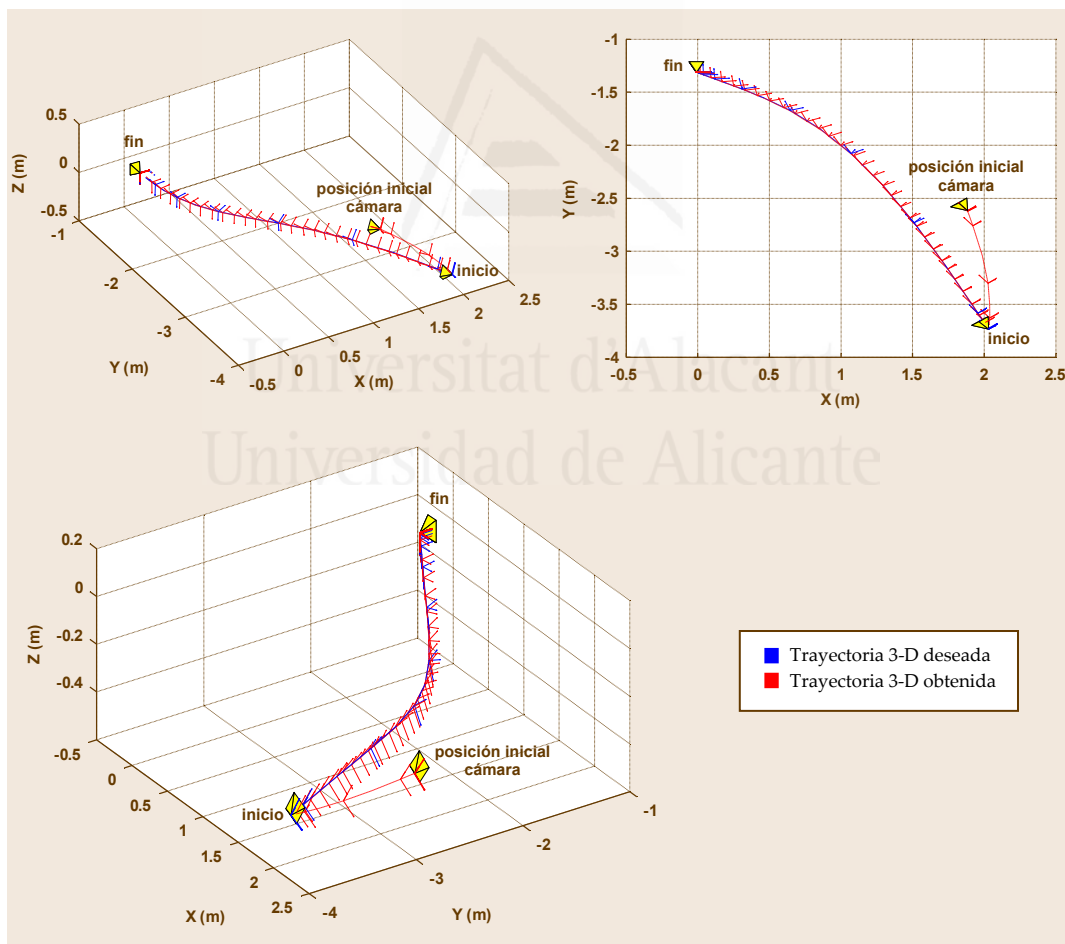


Fig. 3-33 Trayectoria descrita por la cámara en el espacio 3-D. Posición inicial fuera de la deseada. Seguimiento completo de la trayectoria deseada

En la Fig. 3-34 se muestra un experimento en el que la posición inicial de las características no se encuentra en la trayectoria deseada. Se observa que el controlador determina la configuración  $^ks$  más cercana a la configuración inicial. Una vez alcanzada

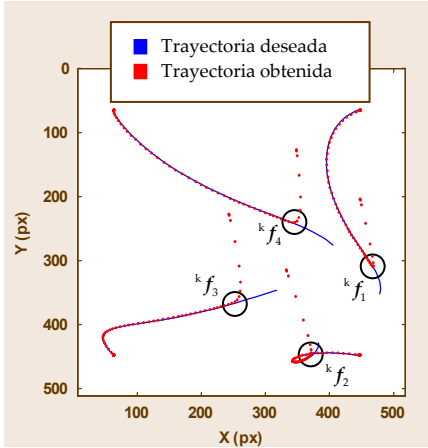


Fig. 3-34 Comparativa entre la trayectoria real y la trayectoria deseada para la aproximación de búsqueda del lugar más cercano de la trayectoria. (La posición inicial no se encuentra en la trayectoria deseada)

$k_s$  el sistema continúa la evolución de las características según la trayectoria deseada codificada en  $T$ .

Se puede observar que este experimento es semejante al que se mostró en el Apartado 3.7.1.1 por lo que la trayectoria 3-D a partir de la configuración de control debería ser la misma que la obtenida en dicho apartado. Esto se puede observar en la Fig. 3-35 en la que se representa la evolución del sistema de coordenadas de la cámara ubicada en el extremo del robot. En esta figura se observa cómo la cámara tiende a aproximarse hacia un punto de la trayectoria requerida y, una vez alcanzada la configuración de control, continua su evolución según la trayectoria deseada. Este punto de la trayectoria representa el punto de la trayectoria deseada que desde la configuración inicial del robot se alcanza con una menor velocidad. Es decir, el punto más cercano de la trayectoria deseada desde la posición actual.

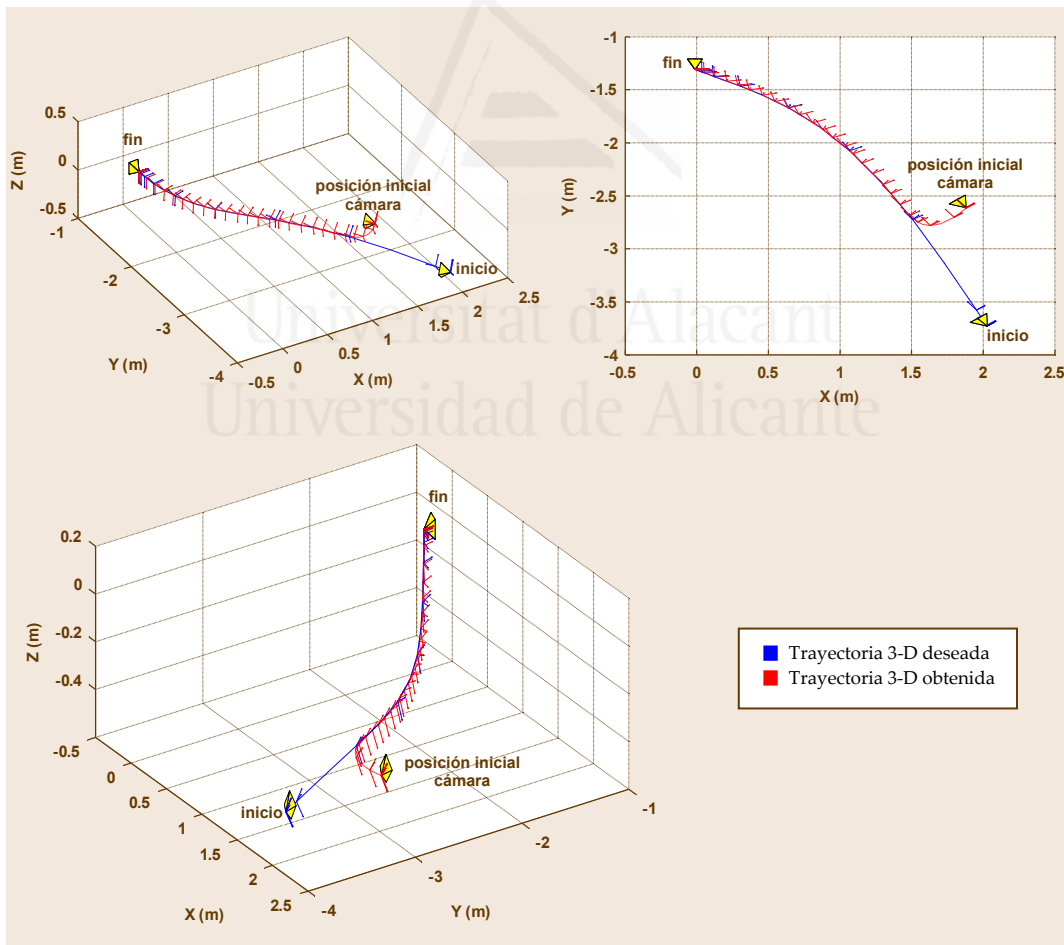


Fig. 3-35 Trayectoria descrita por la cámara en el espacio 3-D. Posición inicial fuera de la deseada. Seguimiento completo de la trayectoria deseada

El hecho de tener que realizar un desplazamiento previo entre la posición inicial de la cámara y la posición inicial de la trayectoria a seguir (en el primer caso), o la posición más cercana (en el segundo), implica obtener velocidades mayores hasta llegar al comienzo de la trayectoria. En la Fig. 3-36 se representa el error cometido en píxeles en cada iteración. Se observa como en la primera aproximación (Fig. 3-36.(a)) el error en píxeles es mayor al comienzo, que el obtenido en la segunda aproximación (Fig. 3-36.(b)). Esto es lógico, ya que en la segunda aproximación se busca la configuración

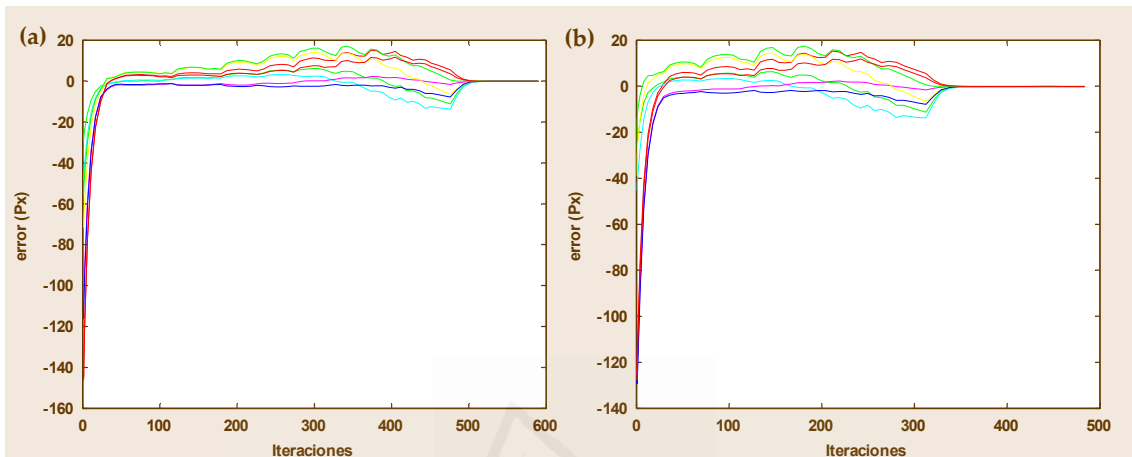


Fig. 3-36 Error en la imagen: (a) Primera aproximación: seguimiento de la trayectoria completa. (b) Segunda aproximación: búsqueda de la posición inicial más cercana

más cercana para moverse hacia ella, no importando realizar el seguimiento completo de la trayectoria deseada. En la primera aproximación, el hecho de tener que seguir completamente la trayectoria hace que se obtenga un mayor error inicial.

Este error en las primeras iteraciones entre las características actuales y las deseadas conlleva un aumento en las velocidades iniciales (ver Fig. 3-37). Hay que recalcar, sin embargo, que en el momento en el que se alcanza alguna configuración dentro de la trayectoria deseada, se sigue realizando el control de velocidad descrito en los apartados anteriores. Esto ocurre en las dos aproximaciones.

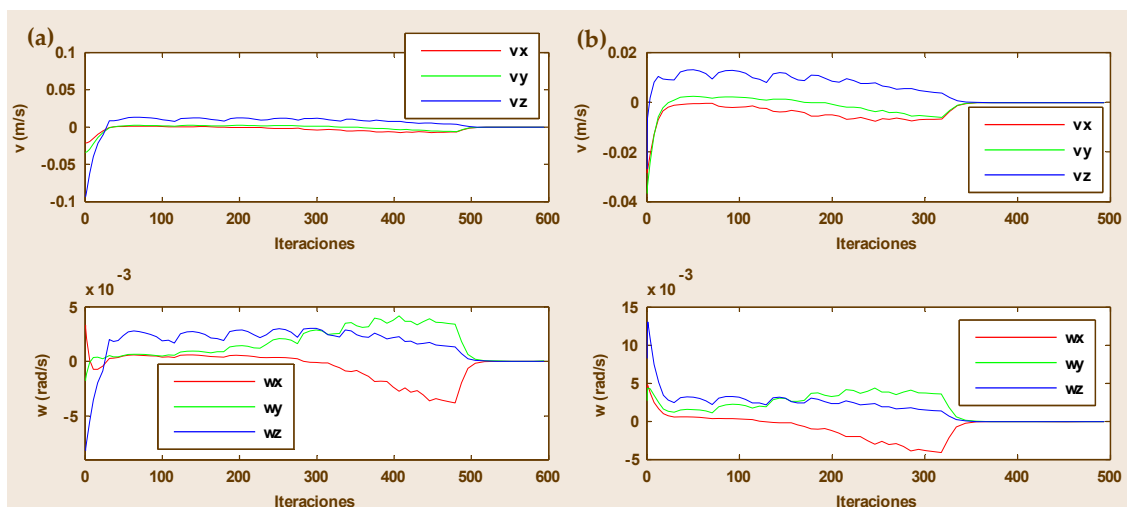


Fig. 3-37 Velocidades aplicadas al robot durante el seguimiento de la trayectoria: (a) Primera aproximación: seguimiento de la trayectoria completa (b) Segunda aproximación: búsqueda de la posición inicial más cercana



La Fig. 3-38 permite comprobar que el control del módulo de la velocidad de traslación se sigue llevando a cabo en el momento en el que se alcanza una configuración válida. Se puede apreciar que la velocidad inicial es mayor en el primer caso (Fig. 3-38.(a)) que en el segundo caso en el que se ha buscado la posición más cercana (Fig. 3-38.(b)).

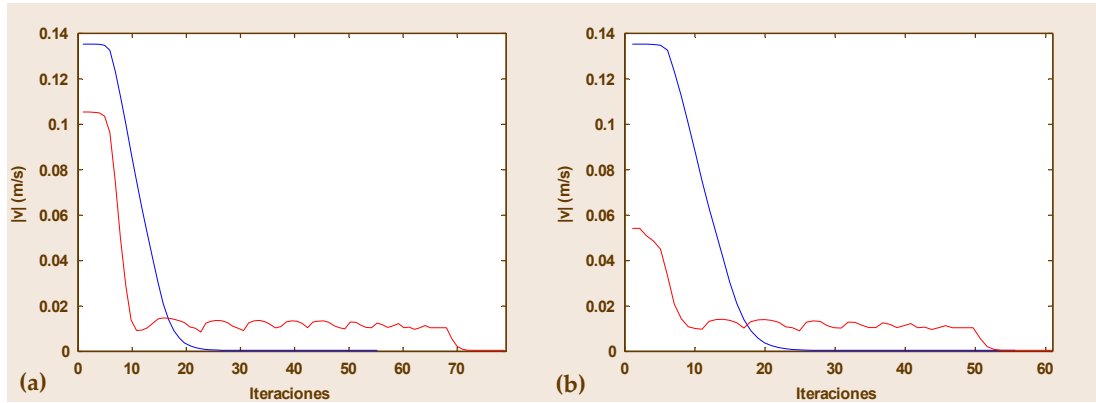


Fig. 3-38 Evolución con el tiempo del módulo de la velocidad aplicada al robot: (a) Primera aproximación: seguimiento de la trayectoria completa (b) Segunda aproximación: búsqueda de la posición inicial más cercana

### 3.7.1.3 Trayectoria en espacio imagen muy oscilante

La primera trayectoria con la que se ha evaluado el método propuesto presentaba un bucle en la evolución de una de las características. Este tipo de trayectorias planteaba ciertos problemas al control visual basado en flujo de movimiento descrito en el Apartado 3.3. Con las pruebas realizadas se ha comprobado que el sistema propuesto en la sección 3.5 funciona correctamente ante situaciones como la descrita.

A continuación se va a evaluar el correcto seguimiento del método propuesto ante trayectorias deseadas muy oscilantes. Para ello, en la Fig. 3-39 se puede observar el muestreo de la nueva trayectoria deseada, tanto en el espacio Cartesiano 3-D como en el plano imagen. En este tipo de trayectorias se hace crítico el parámetro del muestreo de la trayectoria deseada. Con pocas muestras la trayectoria seguida no se ajustará a la deseada, mientras que al aumentar el número de muestras se observará como se consigue calcar la trayectoria tanto en imagen como en 3-D.

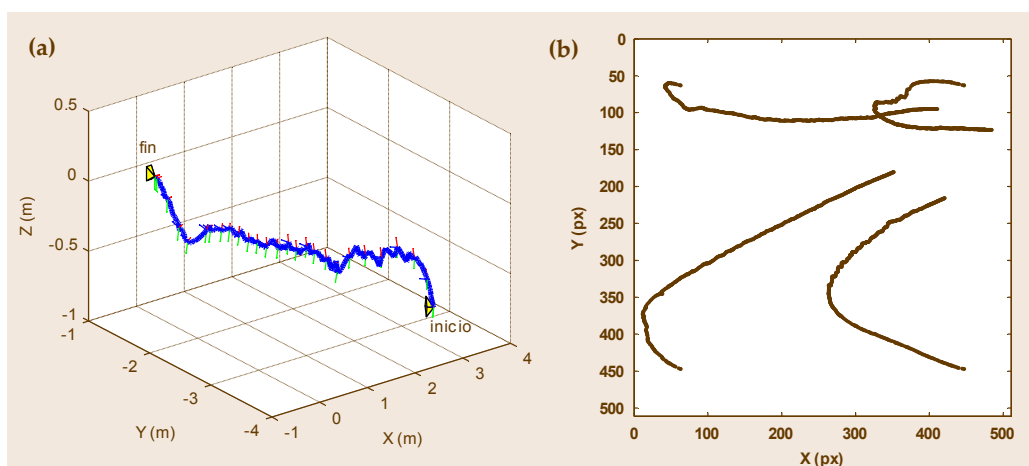


Fig. 3-39 Muestreo de la trayectoria deseada en el espacio cartesiano 3-D y en la imagen

Ajustando la velocidad a 10 mm/s y con el muestreo máximo se consigue realizar un seguimiento perfecto de la trayectoria deseada. En la Fig. 3-40.(b) se puede ver que tanto la trayectoria real obtenida con el método propuesto en el Apartado 3.5, como la trayectoria deseada se superponen.

La Fig. 3-41 muestra que el resultado es también satisfactorio en el espacio 3-D. El seguimiento empeora cuando se aumenta la velocidad del sistema o cuando se disminuye el número de muestras de la trayectoria deseada. Estos resultados se verán en las siguientes secciones.

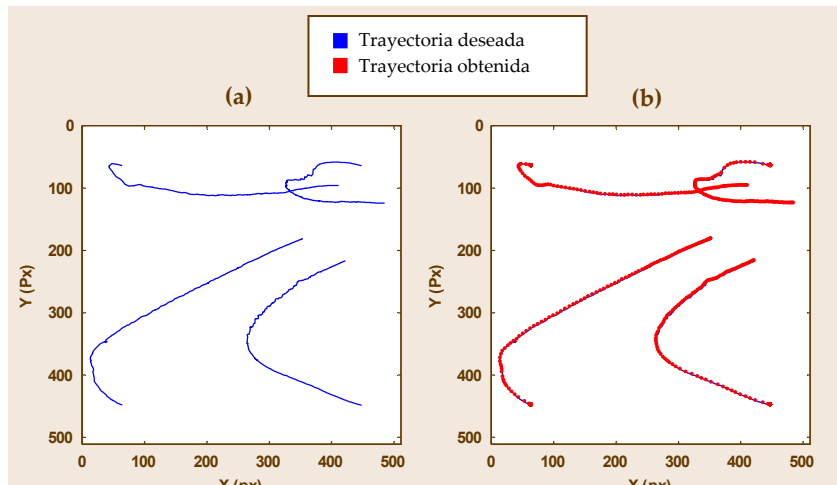


Fig. 3-40 (a) Trayectoria deseada en la imagen. (b) Comparativa entre la trayectoria deseada y la obtenida con el método de seguimiento propuesto

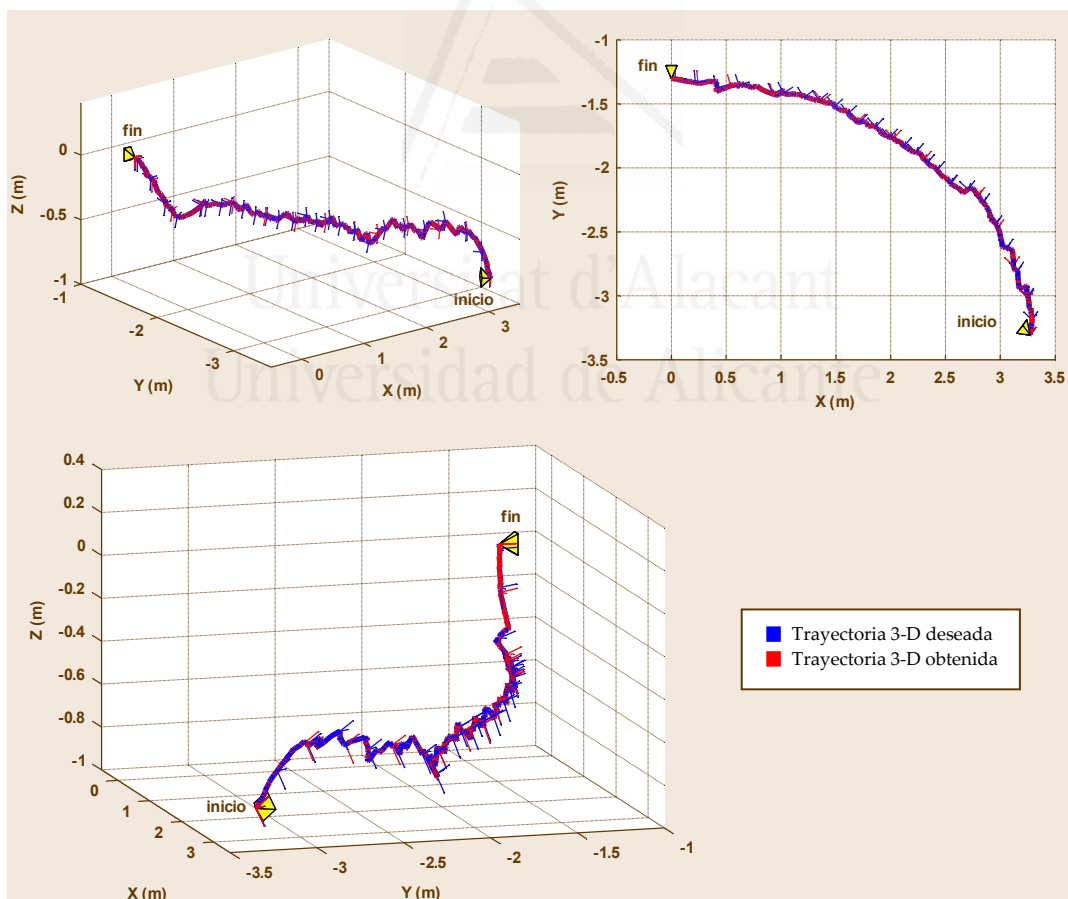


Fig. 3-41 Trayectoria descrita por la cámara en el espacio 3-D. Posición inicial fuera de la deseada. Seguimiento completo de la trayectoria deseada

Con el método propuesto se consigue mantener el error en la imagen por debajo de 15 píxeles durante el seguimiento de la trayectoria. En la Fig. 3-42.(a) se observa

además, que existe un error residual menor de un píxel que no afecta a la terminación de forma correcta de la trayectoria.

La Fig. 3-42.(b) muestra las velocidades enviadas al extremo del robot durante el seguimiento de la trayectoria. El módulo de la velocidad de traslación se mantiene constante en torno a 10 mm/s tal y como se esperaba.

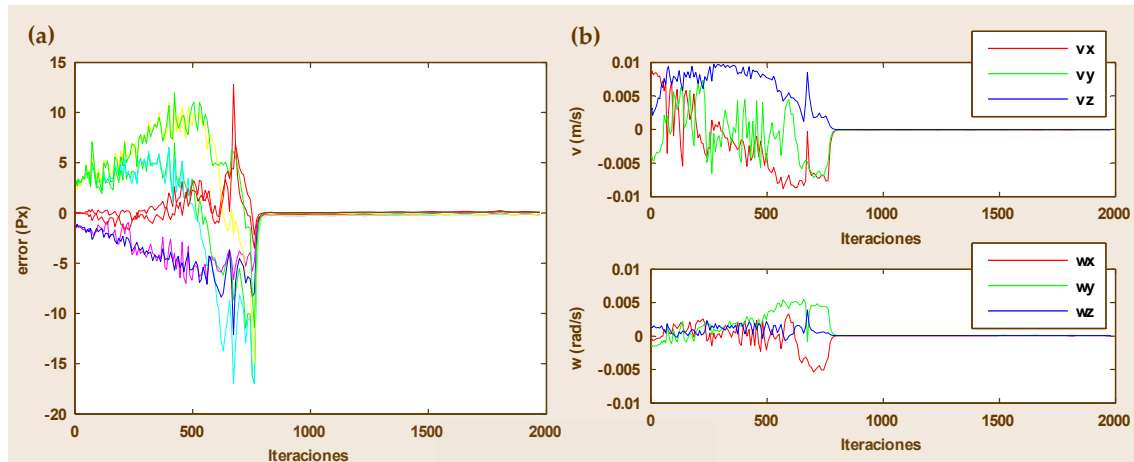


Fig. 3-42 (a) Error en la imagen. (b) Evolución con el tiempo de la velocidad aplicada al robot

### 3.7.2 Resultados experimentales. Comparativa con otros métodos de seguimiento

Para demostrar el correcto funcionamiento en entornos reales de la estrategia propuesta de seguimiento de trayectorias en la imagen basado en control visual virtual, se van a mostrar los resultados obtenidos empleando un sistema robótico, cuya arquitectura se ha descrito en el Apartado 3.6.2, para el seguimiento de distintas trayectorias representativas.

#### 3.7.2.1 Comparativa frente a sistemas de seguimiento con control visual dependientes del tiempo

Como se ha descrito a lo largo de este capítulo, los sistemas que hacen uso de control visual para el seguimiento de trayectorias utilizados hasta la actualidad [Mezouar-2002b, Mezouar-2003, Malis-2004b, Chesi-2005, Chesi-2007a, Chesi-2007b, Mezouar-2009] emplean una referencia variable con el tiempo. Se ha expuesto que estos sistemas no garantizan un correcto seguimiento de la trayectoria, pudiendo ser las referencias excesivamente restrictivas, con lo que el sistema intentará en todo momento mantener estas restricciones temporales a pesar de no realizar un correcto seguimiento de la trayectoria. El hecho de emplear el seguimiento intemporal de trayectorias en la imagen basado en control visual virtual garantiza el correcto seguimiento, no viéndose el sistema afectado ante restricciones temporales (ver [video3-5mpg](#) en DVD adjunto).

Supóngase que el robot se encuentra trabajando en un entorno real en el que puede interactuar con cualquier elemento del entorno. Para posibilitar esto, se introduce en el robot un sensor de fuerza de forma que cuando se detecte una fuerza de interacción elevada se pueda detener el seguimiento de la trayectoria o modificar la misma. Con estas condiciones se realiza el seguimiento de la trayectoria deseada empleando seguimiento intemporal de trayectorias en la imagen basado en control visual virtual. Si

no se realiza ninguna interacción del robot con el entorno, y el sistema de seguimiento intemporal de trayectorias en la imagen basado en control visual virtual actúa normalmente, la duración de la trayectoria es de 12 segundos. Sin embargo, para exponer la diferencia en el comportamiento del sistema con otro dependiente del tiempo, en la Fig. 3-43 se muestra un ejemplo de seguimiento en el que durante el transcurso de la trayectoria ésta se obstruye durante una duración aproximada de 3 segundos.

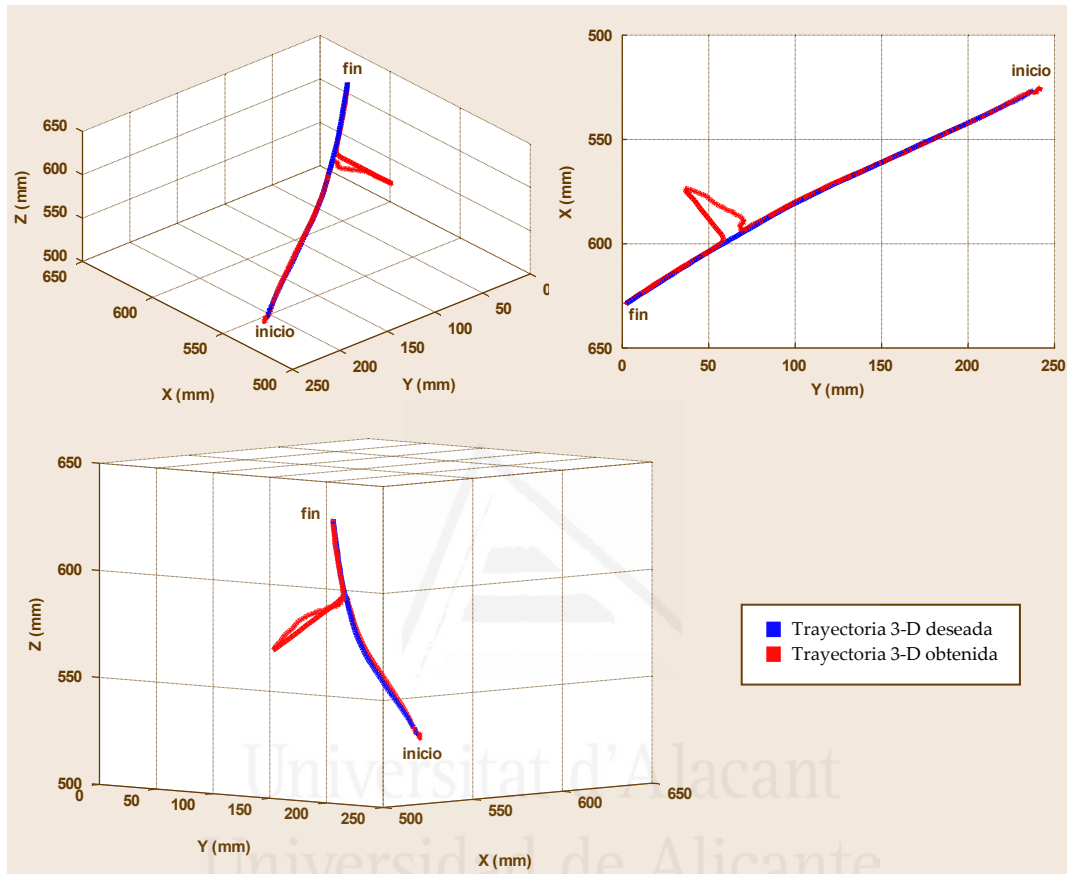


Fig. 3-43 Trayectoria 3-D obtenida con seguimiento intemporal de trayectorias en la imagen basado en control visual virtual

Durante la obstrucción el robot se sale de la trayectoria 3-D deseada. En la Fig. 3-43, además de la trayectoria 3-D descrita por el extremo del robot, también se muestra la deseada en azul. En esta figura se observa que, una vez finalizada la obstrucción de la trayectoria, el sistema continúa con el seguimiento de la misma a partir de la siguiente referencia.

La Fig. 3-44 muestra la evolución de las características en la imagen usando el método propuesto de seguimiento intemporal.

En la gráfica se puede observar el correcto seguimiento de la trayectoria deseada

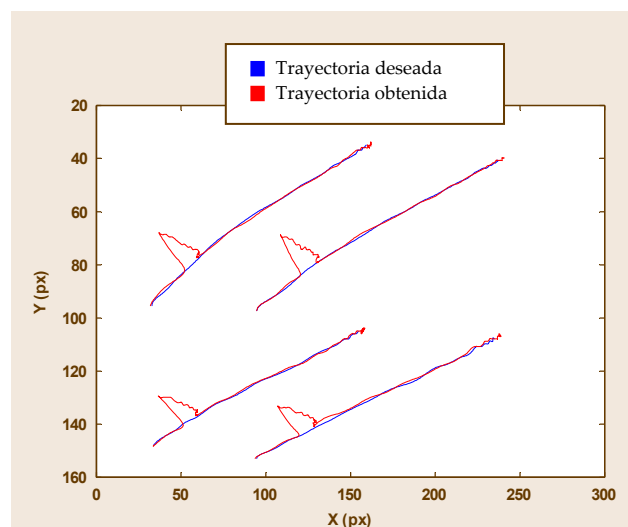


Fig. 3-44 Evolución de las características en la imagen obtenida con seguimiento intemporal de trayectorias en la imagen basado en control visual virtual

da hasta el momento en el que se obstruye el seguimiento de manera externa. A partir de que se libera el robot el sistema vuelve a la trayectoria para terminarla a partir de la siguiente referencia.

Supóngase ahora que se aplica un sistema de control visual con referencias variables con el tiempo para el seguimiento de una trayectoria en imagen. Como se hizo en el caso anterior, durante el transcurso de la trayectoria, ésta se obstruye durante 3 segundos. El resultado del seguimiento obtenido se representa en la Fig. 3-45. En esta figura se ha representado en azul la trayectoria deseada, y se observa claramente como el sistema de seguimiento no es capaz de continuar con la trayectoria una vez finalizada la obstrucción. Esto es debido a que al aparecer cualquier suceso imprevisto durante el seguimiento, como es en este caso una interacción con el entorno, las referencias temporales se desfazan y se hacen excesivamente restrictivas, con lo que el sistema tiende a intentar mantener estas restricciones temporales a pesar de no conseguir realizar el seguimiento de la trayectoria deseada.

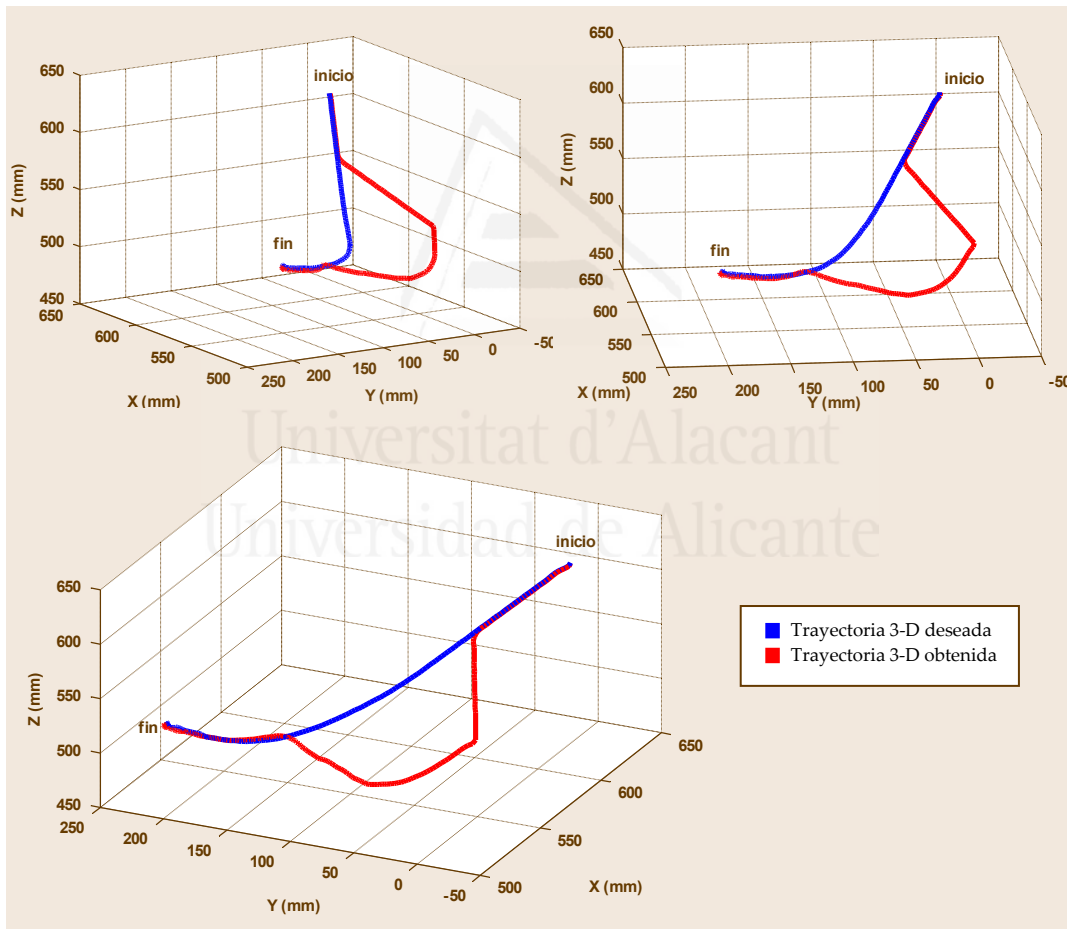


Fig. 3-45 Trayectoria 3-D obtenida con sistemas dependientes del tiempo (Obstrucción de 3 s)

El efecto expuesto en la Fig. 3-45 se muestra con mayor claridad si la duración de la obstrucción es mayor. Para ello, en la Fig. 3-46 se muestra un ejemplo de seguimiento en el que la duración de la obstrucción es de 6 segundos. Este aspecto resulta fundamental cuando el robot interactúa con el entorno, tal y como se verá en el Capítulo 6, ya que, por ejemplo, una operación de desensamblado puede retener el robot más

tiempo del necesario y el comportamiento deseado sería el de continuar con la trayectoria independientemente de la duración de la obstrucción.

La Fig. 3-47 muestra la evolución de las características en la imagen usando un método de seguimiento temporal. En la gráfica se puede observar el correcto segui-

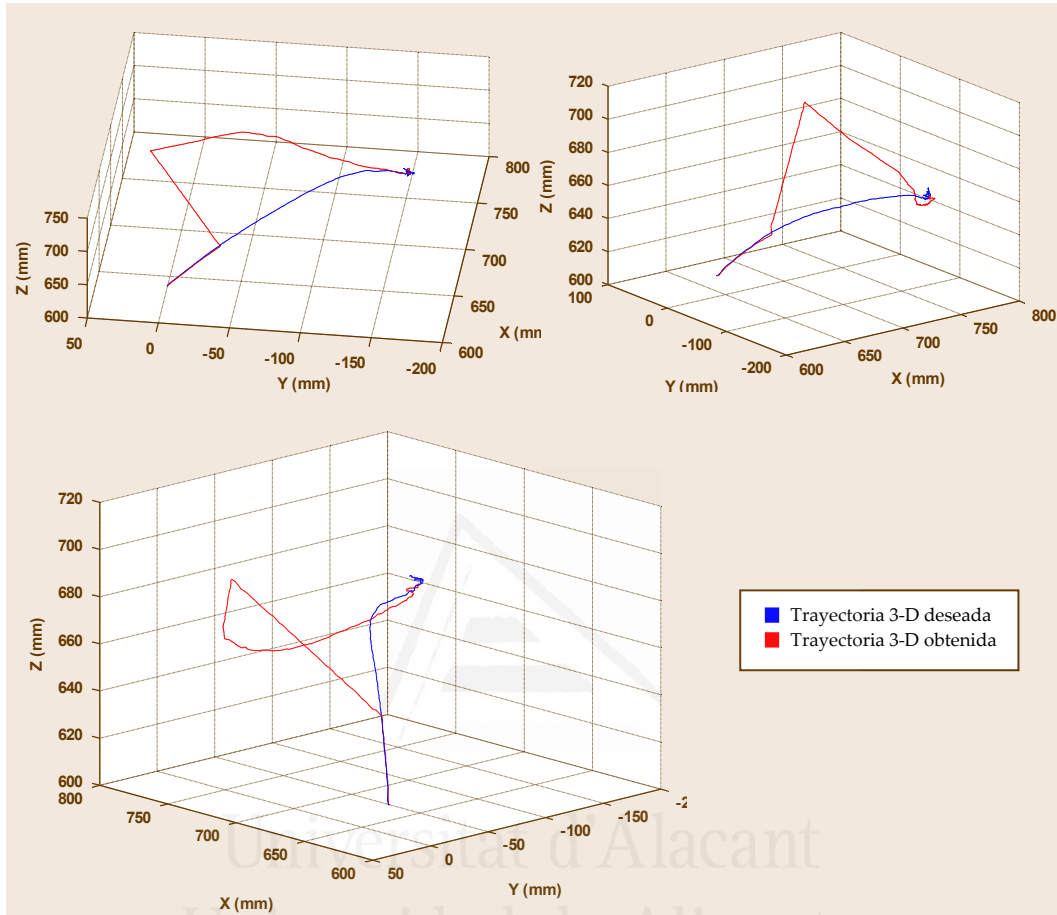


Fig. 3-46 Trayectoria 3-D obtenida con sistemas dependientes del tiempo (Obstrucción de 6 s)

miento de la trayectoria deseada hasta el momento en el que se obstruye el seguimiento de manera externa. Sin embargo, a partir de que se libera el robot el sistema es incapaz de volver a la trayectoria deseada en el punto en el que había comenzado la obstrucción, ya que se han perdido las referencias temporales.

En la Fig. 3-47 se muestra la evolución de las características en la imagen para una obstrucción de 6 segundos. Como la obstrucción ha durado demasiado tiempo, se han perdido todas las referencias y en ningún momento el sistema es capaz de llevar al robot a un punto intermedio de la trayectoria deseada. Este problema puede impedir el correcto funcionamiento de un sistema robótico para

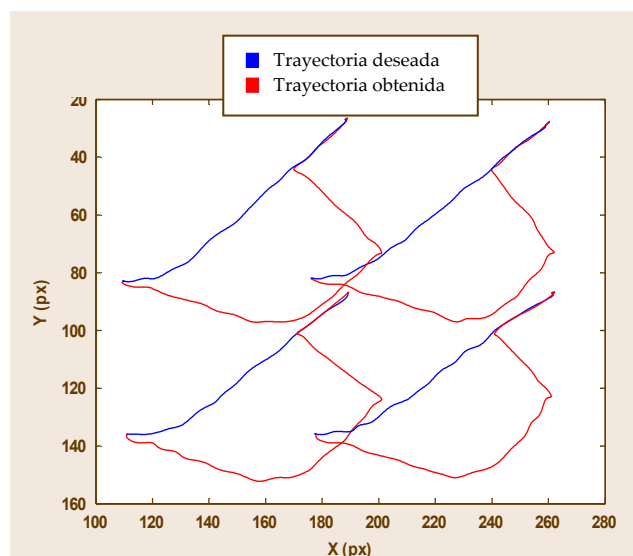


Fig. 3-47 Evolución de las características en la imagen obtenida con sistemas de seguimiento temporales



tareas de repetición de trayectorias como podría ser un sistema automático de corte o de inspección de piezas. En la carpeta VidCap3 del DVD adjunto a esta Tesis se puede ver una prueba de seguimiento. En el [video3-1.mpg](#) se muestra una trayectoria deseada. El mal comportamiento de un sistema temporal se puede ver en el [video3-2.mpg](#). Sin embargo, como se observa en los vídeos [video3-3.avi](#) y [video3-4.avi](#), cuando el robot es alejado de su trayectoria deseada, con el método intemporal se retoma siempre ésta desde el punto en el que se dejó.

### 3.7.2.2 Comparativa con control visual basado en flujo de movimiento

El método propuesto para el seguimiento de trayectorias en la imagen mejora ciertos aspectos del control visual basado en flujo de movimiento descrito en el Apartado 3.3. La principal mejora radica en el hecho de tratar de forma conjunta la información de las características visuales observadas en una determinada posición de la cámara a lo largo de la trayectoria deseada. En el control visual basado en flujo de movimiento, las trayectorias se siguen de forma individual para cada característica. Esto obliga a retrasar el seguimiento de la trayectoria individual más rápida para que adecúe su velocidad a la del resto de trayectorias individuales. En el método propuesto, el seguimiento se realiza contemplando las características visuales como un único vector de características  $k^s$ . De forma que el sistema tratará de mover al robot hacia una posición válida de la cámara dentro de la trayectoria predefinida. Además, el nuevo método propuesto, permite especificar una velocidad de seguimiento. En el control visual basado en flujo de movimiento esto no es posible directamente. Para controlar la velocidad se tiene que modificar varios parámetros que tienen una influencia indirecta en el cambio de la velocidad, pero que a su vez introducen problemas de oscilaciones y error en el seguimiento en imagen y en 3-D.

Para ilustrar las mejoras descritas, se ha realizado el seguimiento de una misma trayectoria con ambos métodos. La trayectoria es la mostrada en la [Fig. 3-48](#).

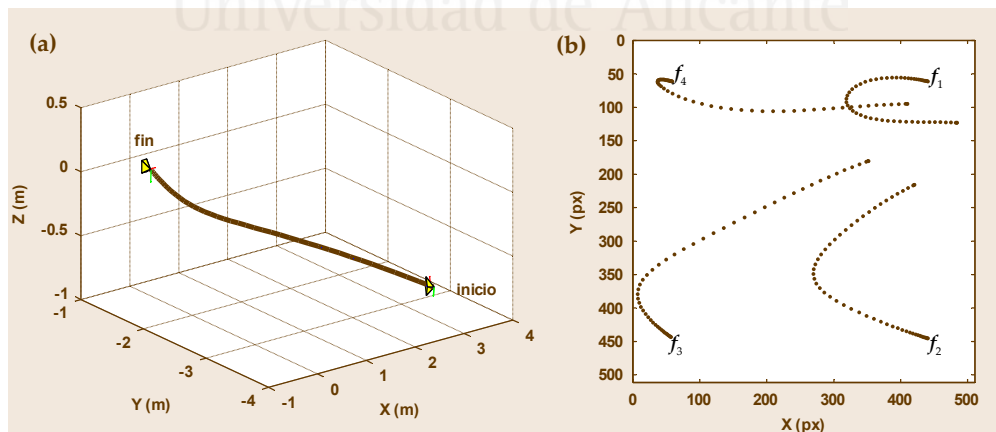


Fig. 3-48 Muestreo de la trayectoria deseada: (a) en el espacio cartesiano 3-D y (b) en la imagen

En una primera prueba, se ejecuta primero el control visual basado en flujo de movimiento con una velocidad (controlada indirectamente a partir de otros parámetros) de aproximadamente 10 mm/s (ver [Fig. 3-49.\(a\)](#)). El objetivo para compararlo con el método propuesto será realizar el seguimiento especificándole la misma velocidad de 10 mm/s (ver [Fig. 3-49.\(b\)](#)).

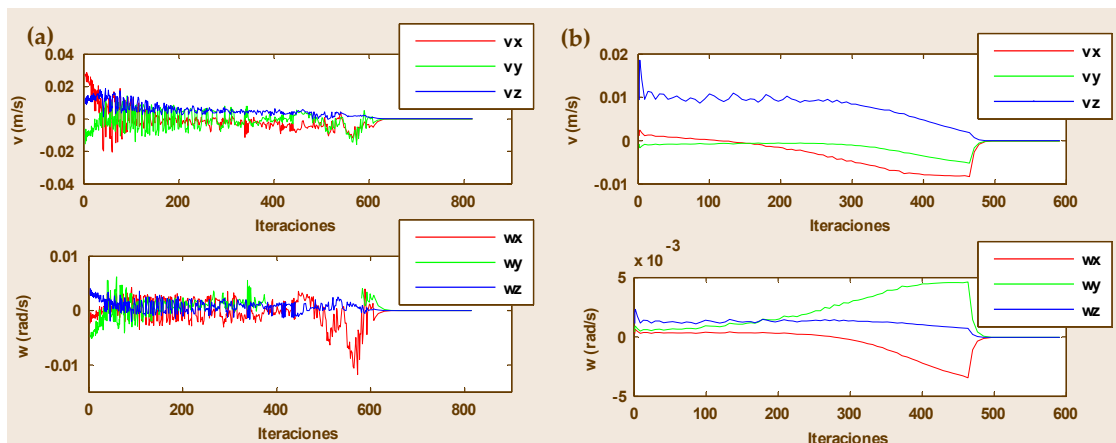


Fig. 3-49 Evolución con el tiempo de la velocidad aplicada al robot. (a) Control visual basado en flujo de movimiento. (b) Método de seguimiento intemporal de trayectorias en la imagen basado en control visual virtual

En la Fig. 3-50 se muestra la evolución del módulo de la velocidad aplicada al robot al realizar la tarea de seguimiento de la trayectoria con ambos métodos. En rojo se representa la evolución del módulo de la velocidad usando control visual basado en flujo de movimiento. Se puede apreciar que el método no permite ajustar la velocidad de modo constante. El módulo de la velocidad es muy oscilante, aunque la media si se sitúa en esos 10 mm/s. En azul está representada la evolución del módulo durante el seguimiento con el método propuesto. Aquí sí se observa que se controla correctamente la velocidad del seguimiento, obteniendo los 10 mm/s deseados en régimen estacionario.

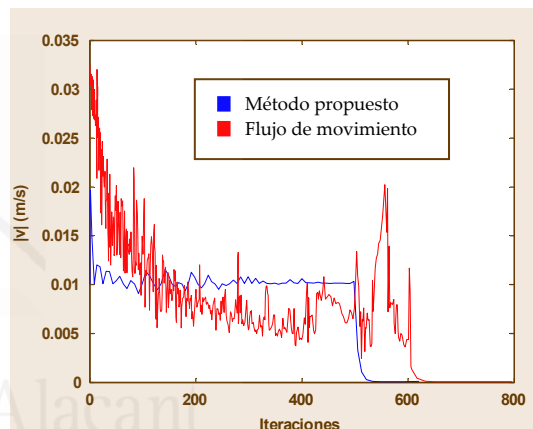


Fig. 3-50 Evolución con el tiempo del módulo de la velocidad aplicada al robot

Con esta velocidad, se obtiene un resultado aceptable tanto con el control visual basado en flujo de movimiento, como con el método propuesto de seguimiento de trayectorias en la imagen basado en control visual virtual. La Fig. 3-51 muestra la trayectoria deseada, así como la evolución de las características en la imagen al utilizar ambos métodos para el seguimiento.

El método propuesto consigue mayor precisión a la misma velocidad que el basado en flujo de movimiento. Este hecho se hace más patente al aumentar la velocidad del seguimiento. Con el objetivo de ilustrar este aspecto, se realiza la misma prueba modificando los parámetros del flujo de movimiento que permiten obtener una velocidad mayor durante el seguimiento. La velocidad, tal y como ocurría en la prueba anterior, es más oscilante en el caso de control visual ba-

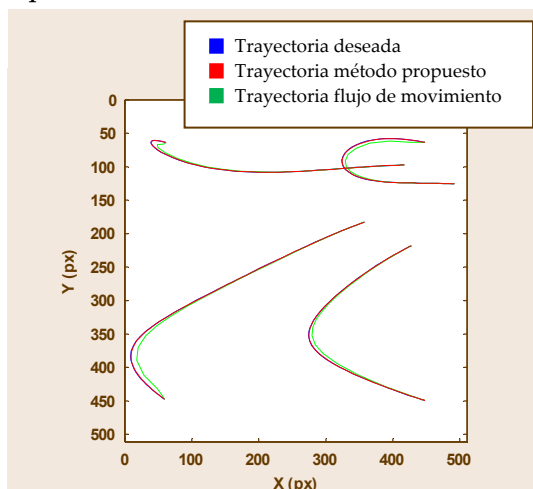


Fig. 3-51 Comparativa entre la evolución de las características en la imagen con control visual basado en flujo de movimiento, con el método de seguimiento de trayectorias en la imagen basado en control visual virtual y la deseada

sado en flujo de movimiento (ver Fig. 3-52.(a)) que en el caso de usar el método propuesto (ver Fig. 3-52.(b)). De nuevo, dado que con control visual basado en flujo de

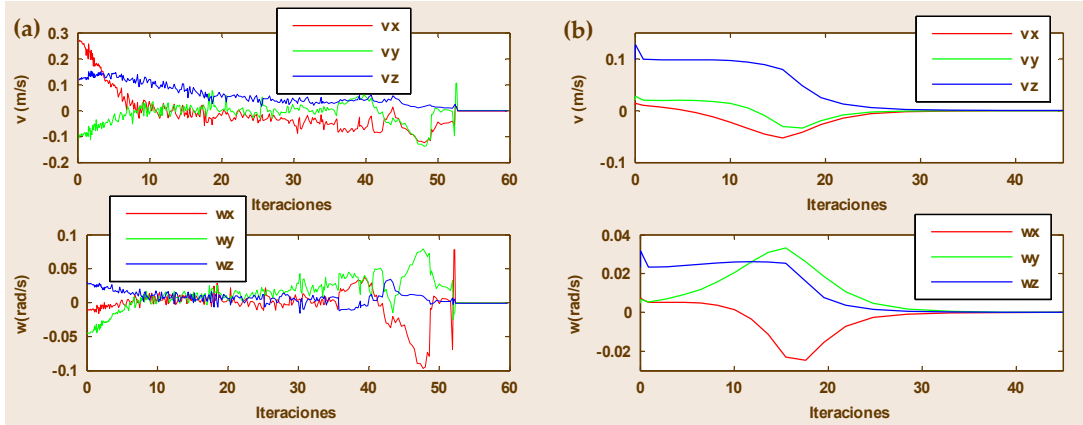


Fig. 3-52 Evolución con el tiempo de la velocidad aplicada al robot. (a) Control visual basado en flujo de movimiento. (b) Método de seguimiento intemporal de trayectorias en la imagen basado en control visual virtual

movimiento no se controla directamente la velocidad del seguimiento, se ejecuta primero este método para, una vez ha concluido la tarea, repetir la prueba con la velocidad con la que se ha realizado el seguimiento con flujo de movimiento.

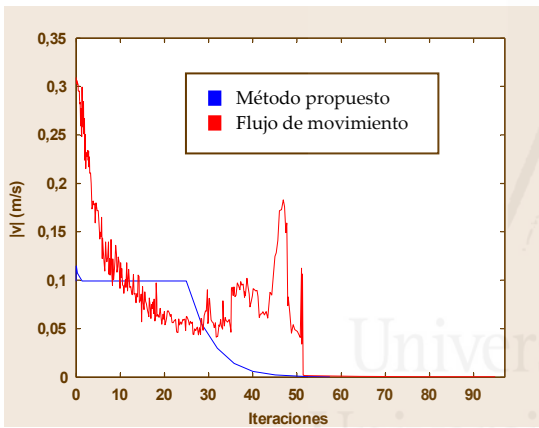


Fig. 3-53 Evolución con el tiempo del módulo de la velocidad aplicada al robot

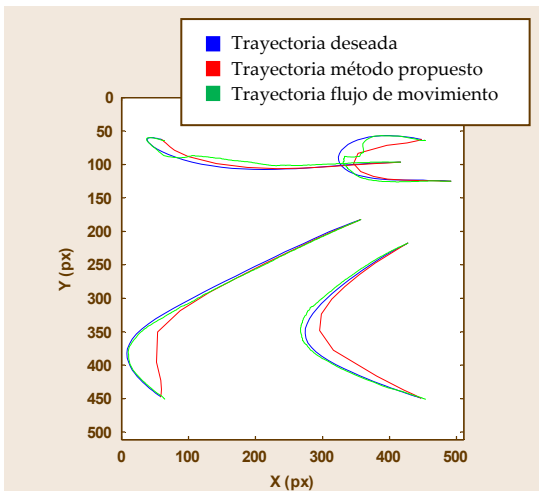


Fig. 3-54 Comparativa entre la evolución de las características en la imagen con control visual basado en flujo de movimiento, con el método de seguimiento de trayectorias en la imagen basado en control visual virtual y la deseada

En la Fig. 3-53 se muestra la evolución del módulo de la velocidad obtenido. Se observa que con el método propuesto se consigue controlar perfectamente la velocidad a 100 mm/s. Con control visual basado en flujo de movimiento se obtiene aproximadamente esa velocidad, pero como se observa, de una manera muy oscilante.

La evolución en la imagen (ver Fig. 3-54), sin embargo, parece mejor en el seguimiento realizado con control visual basado en flujo de movimiento. Sin embargo, tal como muestra la Fig. 3-55, la trayectoria 3-D de la cámara muestra claramente que el método propuesto se aproxima mucho más a la trayectoria 3-D deseada a tan altas velocidades. El control visual basado en flujo de movimiento se vuelve demasiado oscilante, y al no controlar la velocidad directamente, se debe sacrificar precisión para conseguir elevar la velocidad. El resultado es un seguimiento mucho menos preciso de la trayectoria deseada, en más iteraciones y con ningún control sobre la velocidad del seguimiento.

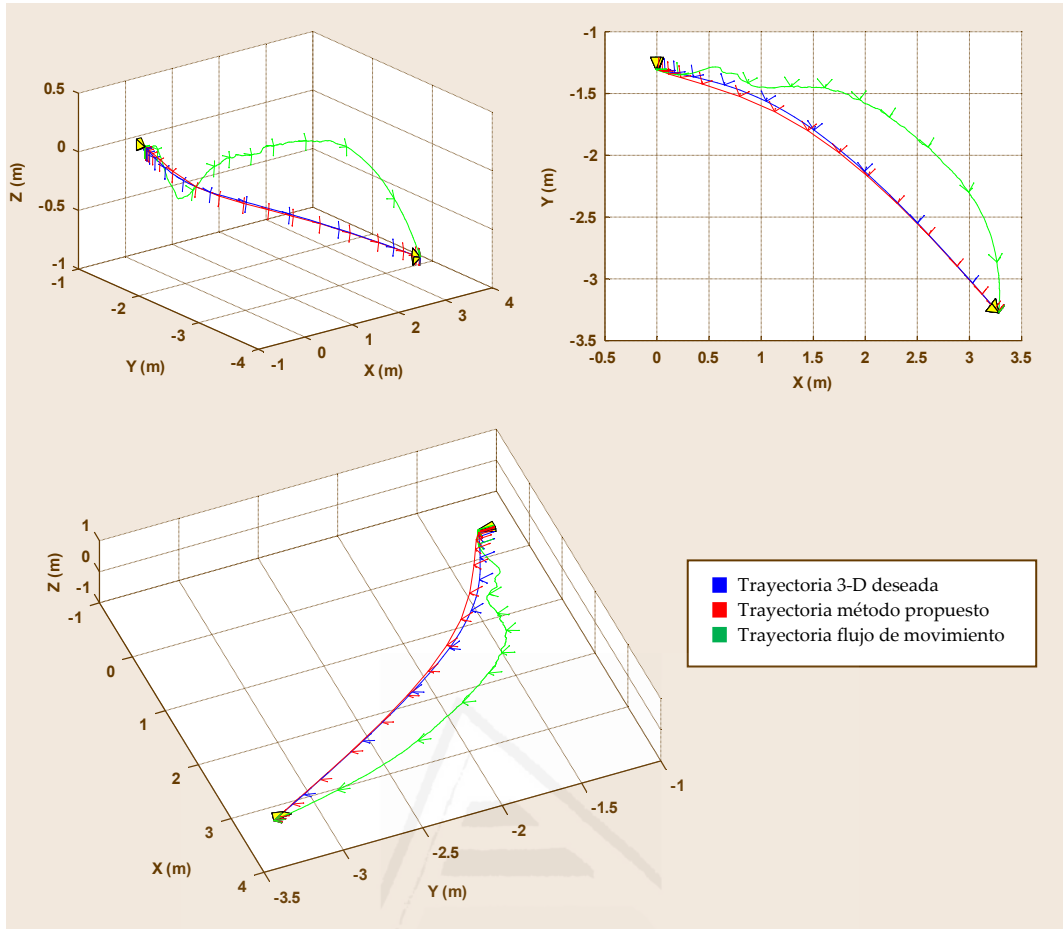


Fig. 3-55 Distintas vistas de la trayectoria descrita por la cámara en el espacio Cartesiano 3-D

### 3.7.3 Estudio del comportamiento frente a variación de los parámetros del sistema

En este apartado se va a analizar la respuesta del sistema ante distintos valores de los parámetros que definen su comportamiento. Dos son los parámetros principales que definen el seguimiento de trayectorias en el espacio imagen utilizando el método propuesto: la velocidad deseada durante el seguimiento, y el muestreo de posiciones de la cámara en la trayectoria deseada.

#### 3.7.3.1 Estudio de la respuesta del sistema ante variaciones en la velocidad

Para analizar el comportamiento del sistema ante variaciones de este parámetro, en la Fig. 3-56 se ha representado la trayectoria 3-D de la cámara para distintas velocidades. Para velocidades superiores a los 40 mm/s se empieza a observar pérdida en la precisión del seguimiento. Sin embargo, estas velocidades son muy altas, y el comportamiento es más que aceptable.

En la Fig. 3-57 se muestra la trayectoria obtenida en la imagen según se aumenta el valor de la velocidad. En esta figura se observa que según se aumenta la velocidad de seguimiento el error obtenido va siendo mayor. Esto es lógico, ya que al aumentar la velocidad se sacrifica precisión.

Finalmente, en la Fig. 3-58 se muestra las velocidades aplicadas al robot en los distintos experimentos realizados. Se observa que la velocidad es controlada satisfac-

toriamente, a la vez que el número de iteraciones va disminuyendo conforme se sube la velocidad deseada.

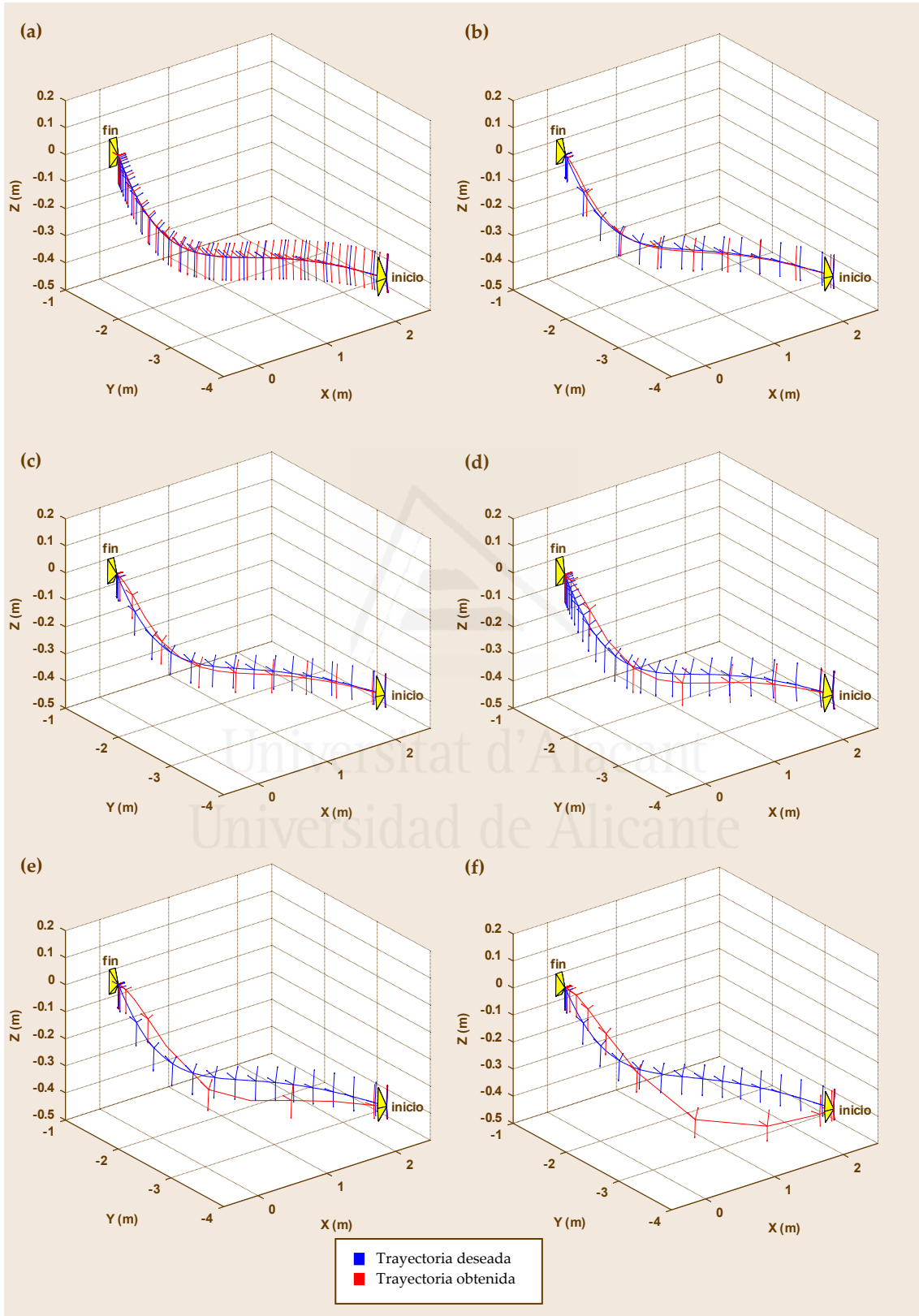


Fig. 3-56 Seguimiento de trayectorias en el espacio 3-D para distintos valores de la velocidad de seguimiento. (a)  $|v|=10\text{mm/s}$  (b)  $|v|=40\text{mm/s}$  (c)  $|v|=70\text{mm/s}$  (d)  $|v|=100\text{mm/s}$  (e)  $|v|=200\text{mm/s}$  (f)  $|v|=400\text{mm/s}$

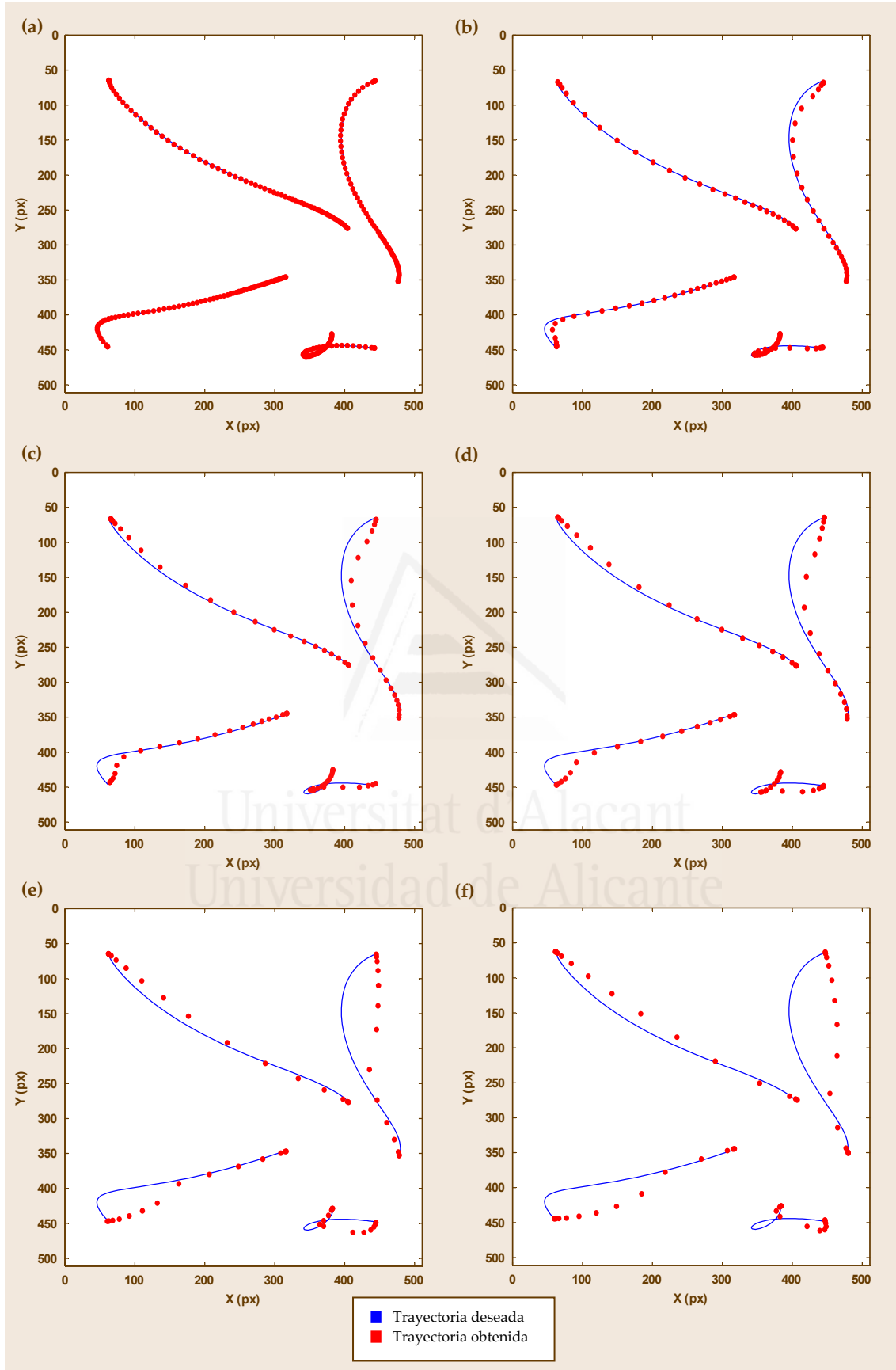


Fig. 3-57 Resultados obtenidos para el seguimiento de trayectorias modificando la velocidad de seguimiento. (a)  $|v|=10\text{mm/s}$  (b)  $|v|=40\text{mm/s}$  (c)  $|v|=70\text{mm/s}$  (d)  $|v|=100\text{mm/s}$  (e)  $|v|=200\text{mm/s}$  (f)  $|v|=400\text{mm/s}$



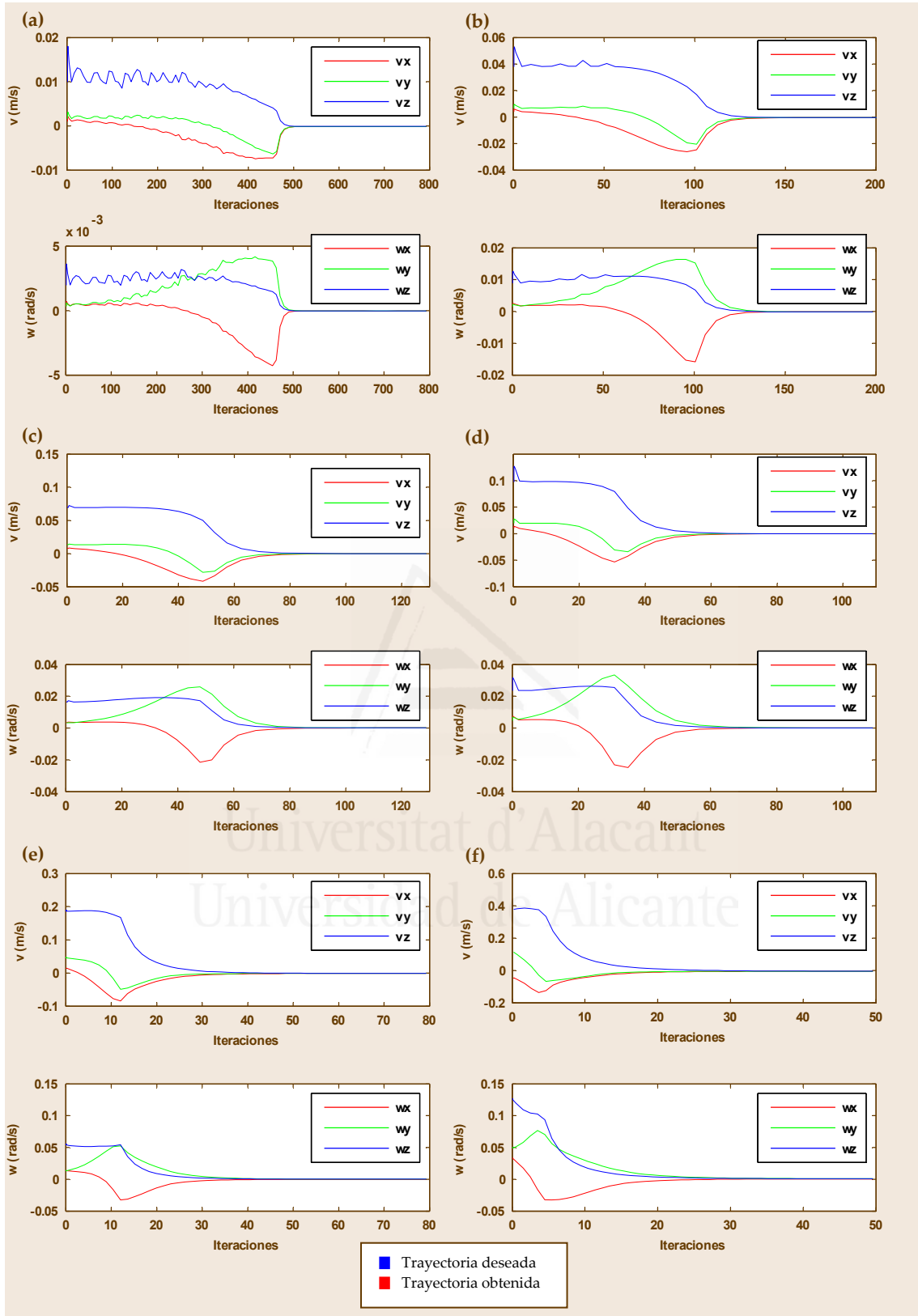


Fig. 3-58 Evolución de la velocidad aplicada al robot para distintos valores de la velocidad de seguimiento. (a)  $|v|=10\text{mm/s}$  (b)  $|v|=40\text{mm/s}$  (c)  $|v|=70\text{mm/s}$  (d)  $|v|=100\text{mm/s}$  (e)  $|v|=200\text{mm/s}$  (f)  $|v|=400\text{mm/s}$

### 3.7.3.2 Estudio de la respuesta del sistema ante variaciones en el muestreo de la trayectoria deseada

En el apartado anterior se ha ilustrado el efecto de cambiar la velocidad deseada durante el seguimiento de la trayectoria dada. Otro parámetro que permite obtener distintas trayectorias, tanto en imagen como en 3-D es el muestreo de la trayectoria deseada. El sistema es capaz de muestrear la trayectoria deseada para realizar el seguimiento. Hasta ahora, en todos los experimentos representados usando el método propuesto se han mostrado trayectorias muestreadas tal y como se definieron en el Apartado 3.2. En la Fig. 3-59 se muestra la evolución de las características en la imagen para distinto muestreo de la trayectoria deseada. El muestreo original es de 1 muestra cada 3,5 cm en la trayectoria 3-D. Se observa que al disminuir el número de muestras se obtiene menor precisión en el seguimiento de la trayectoria deseada.

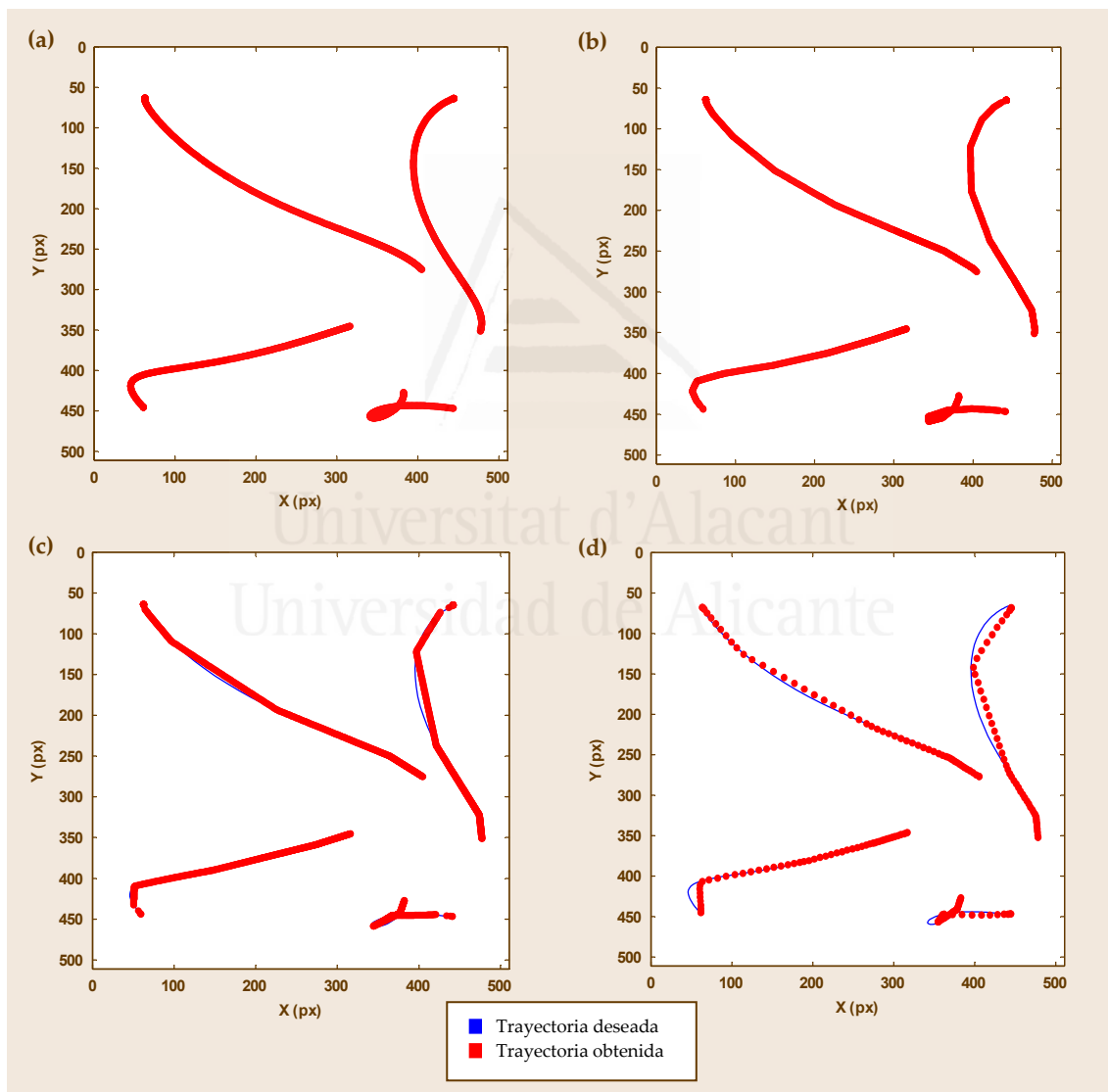


Fig. 3-59 Evolución de las características en la imagen para: (a) Muestreo original (b) 1 de cada 5 muestras (c) 1 de cada 10 muestras (d) 1 de cada 20 muestras

En la Fig. 3-60 se muestra la trayectoria 3-D de la cámara cuando se selecciona 1 muestra de cada 10 en la trayectoria deseada en la imagen. La trayectoria 3-D mantiene su paso por la trayectoria deseada en 1 de cada 10 muestras, realizando una interpola-

ción en 3-D (tanto en posición como en orientación) de la cámara entre muestra y muestra. El resultado es una trayectoria 3-D válida muy próxima a la deseada, pero con menor número de iteraciones, como se puede ver en la Fig. 3-61.(a), donde se muestra la evolución del módulo de la velocidad para distintas pruebas donde se ha modificado el número de muestras de la trayectoria deseada.

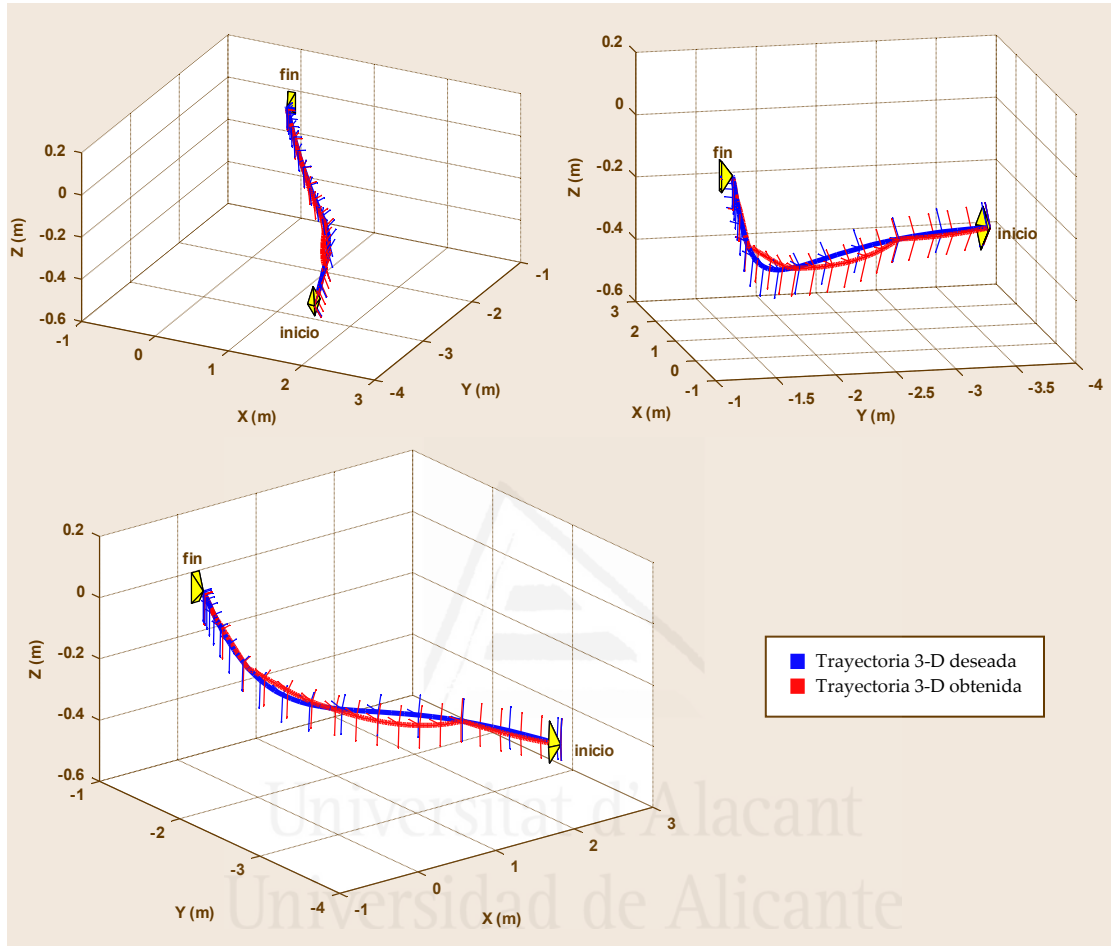


Fig. 3-60 Distintas vistas de la trayectoria descrita por la cámara en el espacio Cartesiano 3-D para 1 de cada 10 muestras

En la Fig. 3-61 se ha representado en azul la evolución del módulo de la velocidad para el seguimiento de la trayectoria original, es decir, sin modificar el número de muestras. Las distintas gráficas representadas en la Fig. 3-61 muestran la reducción en el número de iteraciones del seguimiento al disminuir el número de muestras de la trayectoria deseada. Al mismo tiempo permite comprobar que el módulo se mantiene constante en torno a los 10 mm/s.

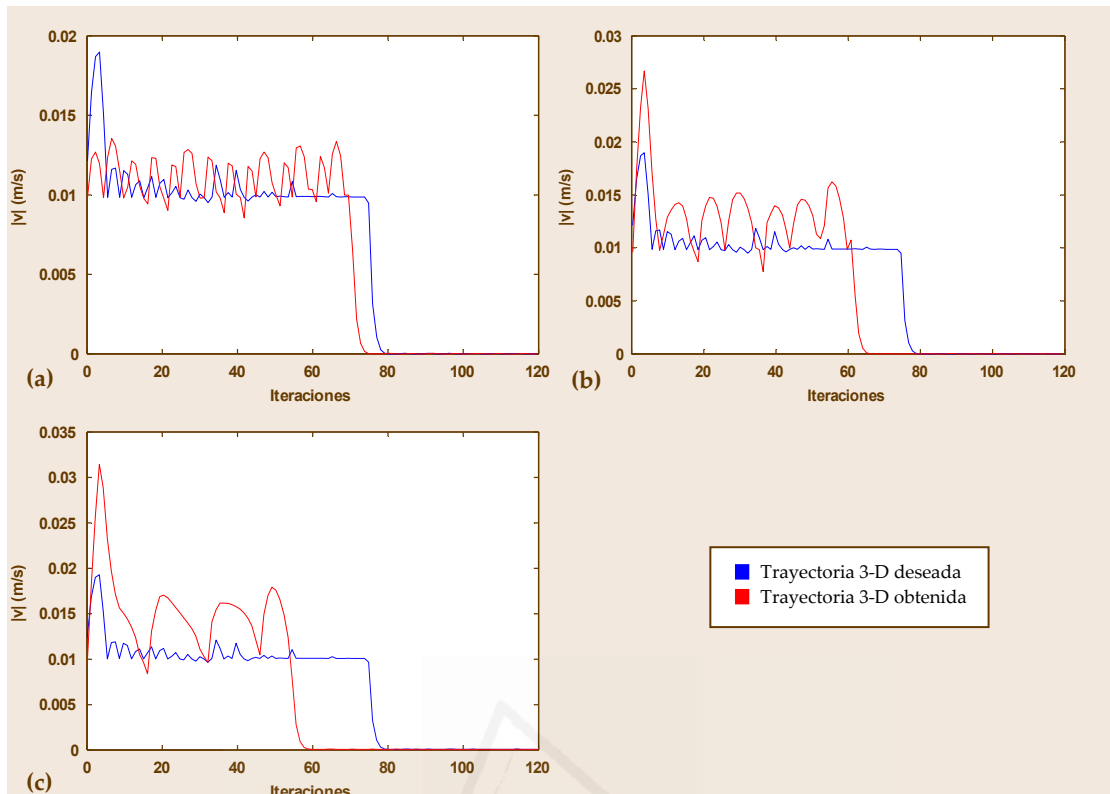


Fig. 3-61 Evolución del módulo de la velocidad para: (a) 1 de cada 5 muestras (b) 1 de cada 10 muestras (c) 1 de cada 20 muestras

En la Fig. 3-62 se ha representado para distinto muestreo de la trayectoria deseada la evolución del error en la imagen durante el seguimiento. Estas gráficas ilustran lo

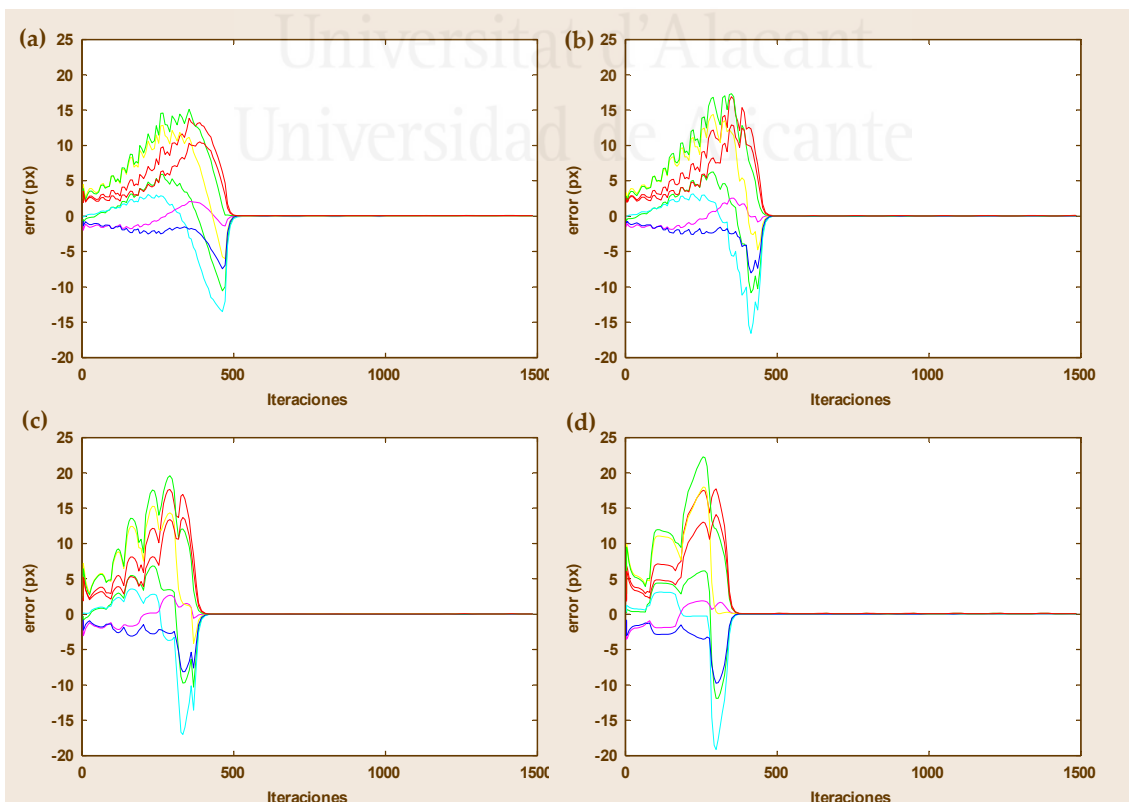


Fig. 3-62 Evolución del error en la imagen durante el seguimiento para: (a) Muestreo original (b) 1 de cada 5 muestras (c) 1 de cada 10 muestras (d) 1 de cada 20 muestras

que se comentaba anteriormente de la disminución de la precisión al disminuir el número de muestras.

El seguimiento intemporal de trayectorias en la imagen basado en control visual virtual permite modificar el número de muestras de la trayectoria que se va a seguir. La modificación de este parámetro es, quizás, menos interesante que la modificación de la velocidad. El resultado es un seguimiento en menos iteraciones, con la consecuente pérdida de precisión, ya que se pierde información en la pérdida de muestras.

### 3.8 Conclusiones

En el presente capítulo, se ha presentado un nuevo método (que constituye una de las principales aportaciones de esta Tesis) para realizar el seguimiento de una trayectoria previamente definida en el espacio imagen usando control visual. La mayoría de los métodos propuestos hasta la fecha para realizar esta tarea no tienen en cuenta posibles interacciones con el entorno, ya que presentan un comportamiento temporal. En estos métodos, la obstrucción de la trayectoria no impide seguir enviando referencias al sistema y cuando consigue evitar el obstáculo o éste desaparece, el sistema no será capaz de seguir la trayectoria desde el punto en el que la dejó. Para resolver este problema se ha descrito el control visual basado en flujo de movimiento. Esta técnica sí que presenta un comportamiento intemporal y, por tanto, permite al sistema interactuar con el entorno completando con éxito la tarea de seguimiento de una trayectoria en el espacio imagen. Sin embargo, como se ha presentado en este capítulo, el flujo de movimiento presenta un problema fundamental, que es el de no tratar el seguimiento del objeto en el espacio imagen a partir de todas sus características en conjunto. El flujo de movimiento se calcula de forma individual para cada punto característico, de ahí que la evolución en el espacio imagen de cada punto pueda tener distinta velocidad. Esto llevaría a casos en los que el sistema se encontrara en una configuración 3-D de la cámara imposible.

Previamente a la propuesta realizada para el seguimiento de trayectorias en el espacio imagen, se ha propuesto un seguimiento intemporal basado en el cálculo de una norma de la matriz de homografía 2-D. Este método presenta un comportamiento intemporal, y surge de la necesidad de agrupar las características en un solo parámetro que evite los problemas descritos en la Sección 3.3 con el flujo de movimiento. Sin embargo, tras realizar distintos experimentos, se concluye que el método no es lo suficientemente robusto y se plantea un nuevo método para realizar el seguimiento de las trayectorias en la imagen.

El método propuesto permite resolver los dos problemas. Por un lado presenta un comportamiento intemporal, lo que lo hace especialmente adecuado para tareas en las que haya interacción con el entorno. Por otro lado, este nuevo sistema de seguimiento de trayectorias en la imagen basado en control visual virtual resuelve el problema que presentaba el flujo de movimiento de tratar las características por separado. Agrupando las características durante el seguimiento se consigue obtener siempre una configuración válida en el espacio cartesiano 3-D. Además, este nuevo método propuesto de seguimiento de trayectorias en la imagen permite mantener una velocidad constante durante la tarea.

Como consecuencia de la utilización de esta información no dependiente del tiempo, se concluye un aspecto fundamental de la estrategia descrita en este capítulo que es el hecho de que permite el seguimiento de trayectorias especificadas sin tener en consideración el tiempo. Como han mostrado los resultados obtenidos, el uso del sistema propuesto permite realizar el seguimiento de trayectorias en el espacio de la imagen, evitando las limitaciones y problemas existentes en los sistemas de control visual tanto dependientes como independientes del tiempo que han sido utilizados hasta la actualidad para el seguimiento de trayectorias en el espacio de la imagen.

A partir de las pruebas realizadas, se puede concluir que con el sistema propuesto se obtiene no solo un seguimiento correcto en la imagen, sino también en el espacio Cartesiano 3-D, asegurando una velocidad de seguimiento constante.



Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante





Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante

# Seguimiento de trayectorias con control visual adaptativo

Normalmente, en los sistemas de control visual desarrollados hasta la fecha, la cámara es calibrada en un proceso previo. Esta calibración off-line permite obtener el valor de los parámetros intrínsecos que se necesitan para el cálculo de la matriz de interacción a lo largo de la tarea de control visual. La correcta estimación de estos parámetros internos de la cámara mejora considerablemente el comportamiento de los sistemas de control visual.

En el Capítulo 3 se ha propuesto un sistema capaz de realizar el seguimiento de una trayectoria en la imagen. El muestreo de la trayectoria que la cámara debe realizar entre la posición inicial y la deseada reduce la necesidad de conocer de forma exacta los parámetros intrínsecos de la cámara. Sin embargo, con una calibración off-line, no se tienen en cuenta posibles modificaciones de los parámetros intrínsecos durante la tarea. Estos parámetros varían en situaciones como cuando se modifica el zoom de la cámara o se calienta debido

4.1	<b>Introducción</b> .....	107
4.2	<b>Combinando control visual y control visual virtual</b> .....	109
4.3	<b>Calibración multi-imagen</b> .....	109
4.4	<b>Seguimiento intemporal de trayectorias en la imagen basado en control visual adaptativo</b> .....	112
4.5	<b>Resultados</b> .....	113
4.5.1	Control visual virtual mono-imagen .....	113
4.5.2	Control visual virtual multi-imagen .....	116
4.6	<b>Conclusiones</b> .....	121

al régimen de trabajo, con lo que la calibración inicial no sería correcta.

Una calibración on-line que permita actualizar los parámetros internos de la cámara permitirá no sólo mejorar el comportamiento del sistema de control visual, sino que además posibilitará tener en cuenta los aspectos anteriores. En este Capítulo se propone el uso de control visual virtual para realizar la calibración on-line de la cámara durante cualquier tarea de control visual.

## 4.1 Introducción

En el Capítulo 3 se ha presentado un método para el seguimiento de trayectorias en la imagen generadas a partir de una determinada trayectoria 3-D. A lo largo de la trayectoria 3-D seguida por el robot puede darse el caso de variaciones en los parámetros intrínsecos de la cámara situada en el extremo del robot. En este Capítulo se va a proponer un método para realizar el seguimiento de la trayectoria deseada incluso en situaciones como la descrita en las que se modifican los parámetros intrínsecos a lo largo de la tarea a realizar. Esto es posible gracias al uso de control visual virtual que

permite obtener tanto los parámetros extrínsecos como los intrínsecos de la cámara a partir de la imagen captada por ésta (en el vídeo [video4-1.wmv](#) de la carpeta VidCap4 situada en el DVD adjunto a esta Tesis se observa cómo se actualizan los parámetros extrínsecos de la cámara utilizando control visual virtual). Este método también permitiría realizar el seguimiento de trayectorias cuando la cámara presenta un zoom variable, lo que provoca una modificación de los intrínsecos durante la tarea.

Como se podrá comprobar a lo largo de este Capítulo, el control visual virtual permite calcular los parámetros extrínsecos de una cámara a partir de la información visual obtenida de una imagen captada por ésta. Sin embargo, las pruebas realizadas demostrarán que, aunque se obtienen unos parámetros intrínsecos cercanos a los reales, su resultado depende de la posición inicial de la cámara virtual. Además, durante la calibración, se pueden obtener valores de los intrínsecos imposibles o muy lejanos a los reales [[Pomares-2007a](#)].

En el presente capítulo se presenta un método que permite obtener los parámetros intrínsecos de forma precisa a partir de más de una imagen, incrementando la robustez de los sistemas de control visual virtual clásicos.

En [[Malis-2004b](#)] se propone un sistema de control visual invariante a posibles cambios en los parámetros intrínsecos de la cámara. Sin embargo, usando esta aproximación realmente no se calculan los parámetros intrínsecos durante la tarea, más bien se demuestra que el sistema propuesto es robusto a pesar de grandes errores en la estimación de estos parámetros. A pesar de que los sistemas de control visual son robustos con respecto a errores en los parámetros intrínsecos, se obtiene un mejor comportamiento si estos parámetros son estimados correctamente [[Chaumette-2006](#)] (los parámetros intrínsecos son necesarios para estimar la matriz de interacción que relaciona la velocidad de la cámara y las variaciones de las características en el espacio invariante). En este Capítulo se describe un sistema de control visual que aprovecha las imágenes capturadas durante la tarea para determinar los parámetros internos de la cámara. Este método permite completar la tarea, no sólo sin ningún conocimiento previo de la calibración de la cámara, sino también cuando los parámetros intrínsecos varían durante la tarea. Además, el cálculo de los parámetros de la cámara se realiza en muy poco tiempo, ya que la imagen ya procesada para realizar la tarea de control visual proporciona la información necesaria para hacer converger los parámetros de la cámara virtual a los de la real. La convergencia se consigue con operaciones básicas que no consumen apenas tiempo del procesador.

En las últimas décadas, los métodos para la calibración de las cámaras han sido ampliamente investigados [[TsaiRY-1987](#), [ZhangZ-1999](#)]. Entre estos métodos, se han propuesto sistemas de autocalibración [[Hemayed-2003](#)]. La mayoría de ellos referentes a parámetros intrínsecos desconocidos pero constantes. En este tipo de sistemas es a menudo complicado obtener buenos resultados y el comportamiento depende de la escena observada. En el presente Capítulo se propone el uso de la información de la imagen obtenida durante la ejecución de la tarea de control visual para calibrar la cámara.

## 4.2 Combinando control visual y control visual virtual

Con el objetivo de aumentar la precisión de los sistemas de control visual virtual clásicos y posibilitar su utilización para determinar los parámetros extrínsecos e intrínsecos de la cámara, en este apartado se propone la utilización conjunta de control visual virtual y control visual. Para ello, en cada iteración de un sistema de control visual se ejecutará una convergencia completa de control visual virtual. Además, para dotar de más robustez al sistema, se propone la utilización en la calibración de las últimas  $w$  imágenes, constituyendo lo que se ha denominado calibración multi-imagen.

Una tarea robótica puede describirse con una función que debe ser regulada a cero. La función de tarea  $e$  se define como:

$$e = \mathbf{s} - \mathbf{s}_d, \quad (4.1)$$

donde  $\mathbf{s}$  es un vector que contiene  $i$  características visuales correspondientes con el estado actual, mientras que  $\mathbf{s}_d$  contiene los valores de las características visuales en la posición deseada.  $\mathbf{s}_d$  no sólo depende de la posición deseada de la cámara,  ${}^c\mathbf{M}_{od}$ , sino que también depende de los parámetros intrínsecos,  $\xi$ . Con el objetivo de cumplir con la tarea  $e$  se puede definir una ley de control simple. Imponiendo un decrecimiento exponencial de la función de tarea  $e$  ( $\dot{e} = -\lambda e$ ) (siendo  $\lambda$  una ganancia positiva) se obtiene:

$$v_c = -\lambda \hat{\mathbf{L}}_s^+ (\mathbf{s} - \mathbf{s}_d), \quad (4.2)$$

donde  $\hat{\mathbf{L}}_s^+$  es la pseudoinversa de una estimación de la matriz de interacción. En la estimación de matriz de interacción,  $\hat{\mathbf{L}}_s$  se pueden usar los resultados del método de calibración que se describirá en el siguiente Apartado.

Así, en cada iteración,  $i$ , de la tarea de control visual, se ejecuta una convergencia completa del sistema de control visual virtual utilizando varias imágenes. En el control visual virtual (descrito en el Capítulo 2) las características deseadas,  $\mathbf{p}_d$ , son las observadas en el instante  $i$  ( $\mathbf{p}_d = \mathbf{s}$ ). Las iniciales,  $\mathbf{p}$ , son calculadas por retroproyección usando los parámetros extrínsecos e intrínsecos determinados en el instante  $i-1$ . En cada iteración de la tarea de control visual, los resultados de la calibración se usan para actualizar  $\hat{\mathbf{L}}_s$  y  $\mathbf{s}_d$ .

## 4.3 Calibración multi-imagen

Como se muestra en [Marchand-2001] cuando se emplea control visual virtual para la calibración de una cámara, los parámetros intrínsecos obtenidos pueden variar dependiendo del punto de vista. Una posible solución es integrar en el proceso de minimización información procedente de diferentes imágenes adquiridas desde diferentes cámaras virtuales. Para conseguirlo, si la calibración de la cámara se realiza durante el proceso de control visual, se pueden usar en la calibración distintas imágenes obtenidas durante el movimiento real de la cámara. Considérese que se usan  $w$  imágenes. El

conjunto de  $w$  imágenes también se llama ventana de calibración. Considérese también que los parámetros intrínsecos no varían o que en las  $w$  imágenes la variación de los parámetros intrínsecos puede considerarse nula.

La matriz de interacción considerada para la calibración multi-imagen se formará a partir de la matriz de interacción definida en (2.58), teniendo en cuenta cómo varían las características en la imagen de cada cámara virtual debido a la velocidad y a los parámetros intrínsecos de la cámara virtual:

$$\mathbf{H}_s = \begin{pmatrix} \frac{\partial \mathbf{s}^1}{\partial \mathbf{r}} & 0 & \dots & 0 & \frac{\partial \mathbf{s}^1}{\partial \xi} \\ 0 & \frac{\partial \mathbf{s}^2}{\partial \mathbf{r}} & \dots & 0 & \frac{\partial \mathbf{s}^2}{\partial \xi} \\ \vdots & \vdots & & & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & \frac{\partial \mathbf{s}^w}{\partial \mathbf{r}} & \frac{\partial \mathbf{s}^w}{\partial \xi} \end{pmatrix}. \quad (4.3)$$

Por lo tanto, en este caso, la acción de control y error de la ecuación (2.55) será  $\mathbf{V} = (\mathbf{T}_c^1 \quad \mathbf{T}_c^2 \quad \dots \quad \mathbf{T}_c^w \quad \xi)^T$ , y  $\mathbf{e} = (\mathbf{s}^1 - \mathbf{s}_d^1 \quad \mathbf{s}^2 - \mathbf{s}_d^2 \quad \dots \quad \mathbf{s}^w - \mathbf{s}_d^w)^T$  respectivamente. Un aspecto importante de la calibración multi-imagen es que permite la convergencia en situaciones en las que la calibración mono-imagen no puede proporcionar los parámetros intrínsecos correctos. Estos aspectos se tratarán más adelante, en el Apartado 4.5 de resultados, donde se detallarán distintos experimentos que permiten concluir que la calibración mediante control visual virtual a partir de una sola imagen falla dependiendo de la posición inicial de la cámara virtual y de los valores iniciales estimados de los parámetros intrínsecos de la cámara.

Aunque incrementar el número de imágenes para realizar la calibración de la cámara real mejore el resultado final, este incremento de imágenes lleva asociado un incremento en el número de iteraciones necesarias para obtener una convergencia total del sistema de control visual virtual. El tamaño de la ventana de calibración varía en función de la tarea de calibración. Durante una tarea de control visual, se debe elegir un número de imágenes pequeño que reduzca lo máximo posible el tiempo de proceso requerido. Sin embargo, el uso de un número muy pequeño de imágenes podría producir cambios bruscos en los parámetros intrínsecos estimados. De esta forma, la mejor estrategia es seleccionar de manera dinámica el tamaño de la ventana de calibración durante la tarea. A lo largo de la tarea de control visual se obtienen diferentes estimaciones de los parámetros intrínsecos. Para estimar el valor correcto de los parámetros de calibración se emplea un filtro de Kalman. El vector de estados  $\mathbf{x}_k$  está compuesto por los parámetros intrínsecos,  $\xi$ , los parámetros extrínsecos ( $\mathbf{M}_o^c$  también representado aquí como  $\mathbf{r}_k$ ) y su velocidad  $\dot{\mathbf{r}}_k$ . Los modelos de estado (paso de predicción) y medida (paso de corrección del filtro) son:

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{F}\mathbf{x}_k + \mathbf{G}\mathbf{v}_k, \quad (4.4)$$

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{H}\mathbf{x}_k + \mathbf{w}_k, \quad (4.5)$$

donde  $\mathbf{v}_k$  es ruido blanco de aceleración con valor promedio igual a cero y  $\mathbf{w}_k$  es el ruido de la medida. Considerando un modelo de movimiento basado en la velocidad proporcionada por un sistema de control visual (definida en (4.2)), la Ecuación (4.4) queda de la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{r}_{k+1} \\ \dot{\mathbf{r}}_{k+1} \\ \xi_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{r}_k \\ -\lambda \hat{\mathbf{L}}_s^+ (\mathbf{s} - \mathbf{s}_d) \\ \xi_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\Delta t^2}{2} \\ \Delta t \\ 0 \end{bmatrix} \mathbf{v}_k, \quad (4.6)$$

y el modelo del sensor es:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4.7)$$

Para detectar variaciones en los parámetros intrínsecos se considera la Relación de Verosimilitud Generalizada (GLR) [Willisky-1976]. Para actualizar la estimación del vector de estado se emplea la siguiente ecuación de compensación:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{r}_{k+1} \\ \dot{\mathbf{r}}_{k+1} \\ \xi_{k+1} \end{bmatrix}_n = \begin{bmatrix} \mathbf{r}_{k+1} \\ \dot{\mathbf{r}}_{k+1} \\ \xi_{k+1} \end{bmatrix}_o + a(k; \theta) \cdot \mathbf{F} - a(k; \theta) \cdot j(k; \theta), \quad (4.8)$$

donde los subíndices n y o se refieren a los vectores de estado nuevo y original, respectivamente;  $a(k; \theta)$  es la amplitud del paso obtenida usando el algoritmo de GLR,  $\mathbf{F}$  se define en (4.4) y  $a(k; \theta) \cdot j(k; \theta)$  es el efecto (en el valor de la estimación del vector de estado medido en la iteración k) del paso que se produce en la iteración  $\theta$ . Este método se aplica para detectar cambios en los parámetros intrínsecos, con lo que únicamente la última componente del vector de estado se actualiza en (4.8). En [Pomares-2005c] se pueden encontrar más detalles de la implementación del algoritmo de GLR. Por un lado, cuando se incrementa el GLR, el tamaño de la ventana de calibración se incrementa también para estimar correctamente el valor de los parámetros intrínsecos. Por otro lado, si el GLR disminuye, se considera que el sistema ha convergido correctamente a los parámetros intrínsecos reales y se disminuye el tamaño de la ventana de calibración con el objetivo de mejorar el comportamiento del sistema (reduciendo los retardos). Para implementar este algoritmo, se ha definido la función representada en la Fig. 4-1 para obtener el número de imágenes de la ventana de calibración dependiendo del valor del GLR.

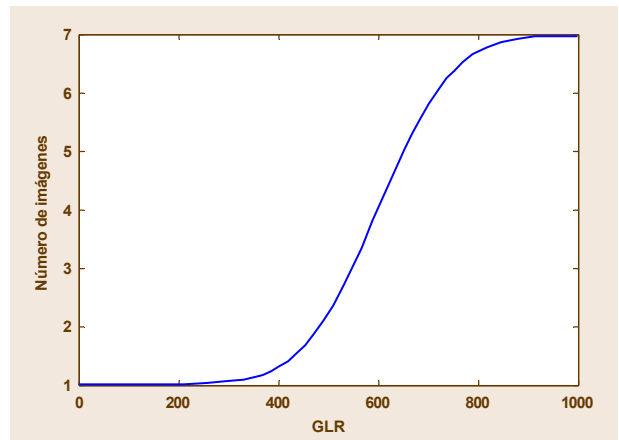


Fig. 4-1 Función usada para determinar el número de imágenes a partir del GLR



### 4.4 Seguimiento intemporal de trayectorias en la imagen basado en control visual adaptativo

La calibración multi-imagen permite obtener, mientras se realiza una tarea de control visual, los parámetros intrínsecos y extrínsecos de la cámara. En el Capítulo 3 se describió un método de seguimiento intemporal de trayectorias en la imagen basado en control visual virtual. Para garantizar el correcto comportamiento de este método se realizaba una calibración previa de la cámara para conocer sus parámetros intrínsecos. Estos parámetros intrínsecos se utilizan en el cálculo de la matriz de interacción que aparece en la ley de control visual basado en imagen (ver Ecuación (2.45)). Aunque la determinación de forma precisa de los parámetros intrínsecos no es necesaria para obtener la convergencia en los sistemas de control visual, el comportamiento del sistema mejora si se consigue estimar su valor de forma correcta. Con el método descrito de calibración multi-imagen se puede actualizar en cada iteración del control visual el valor de los parámetros intrínsecos, y así mejorar el comportamiento del sistema.

Además, la inclusión de la calibración multi-imagen en cada iteración del control visual aporta la posibilidad de realizar un seguimiento de la trayectoria deseada en condiciones en las que los parámetros internos de la cámara se modifiquen. Esto permite, por ejemplo, realizar seguimiento de trayectorias en la imagen con variaciones en la distancia focal de la cámara. En la Fig. 4-2 se muestra en rojo la aportación de la calibración multi-imagen al esquema del seguimiento intemporal de trayectorias en la imagen basado en control visual virtual descrito en el Apartado 3.5.

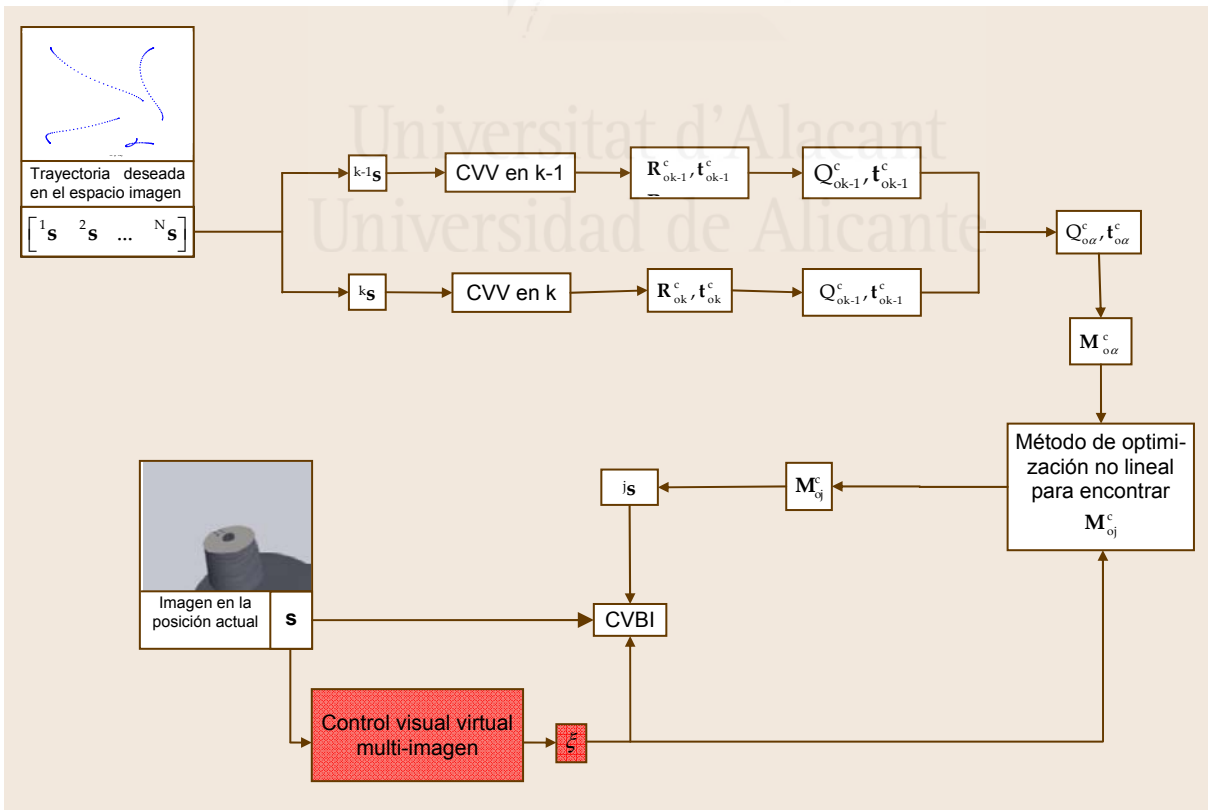


Fig. 4-2 Esquema del método de seguimiento intemporal presentado en el apartado 3.5 con la mejora de la calibración multi-imagen

## 4.5 Resultados

Para la realización de las pruebas de calibración, se ha empleado una cámara en configuración “*eye-in-hand*” que ha sido sometida previamente a un proceso de calibración off-line que permita estimar los parámetros intrínsecos (ver Fig. 4-3.(a)). Usando el método de Zhang [ZhangZ-1999] se han obtenido los siguientes parámetros intrínsecos: las coordenadas del punto principal son  $(u_0, v_0) = (168.75, 121.5)$  px, y la distancia focal en las direcciones  $u$  y  $v$  son  $(412.92, 423.69)$  mm respectivamente. Se han usado 10 imágenes para hacer esta calibración previa. Para la calibración usando la aproximación de control visual virtual se ha empleado el objeto 3-D representado en la Fig. 4-3.(b) del que se pueden extraer 5 elipses.

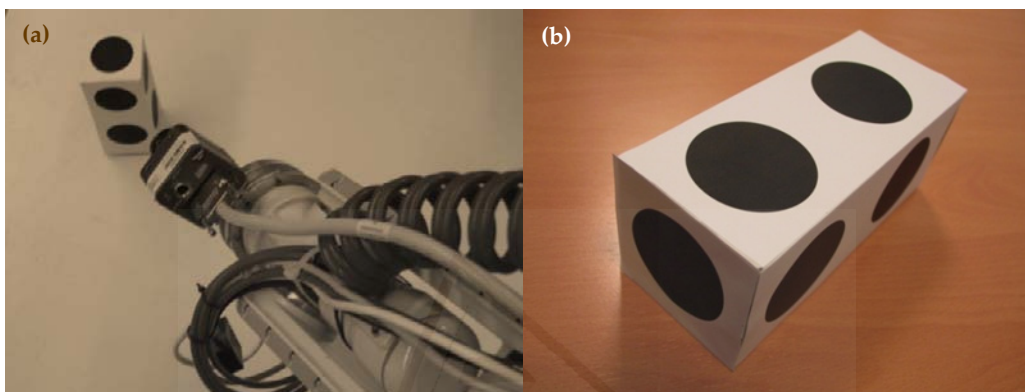


Fig. 4-3 (a) Configuración “*eye-in-hand*” para las pruebas de calibración (b) Objeto 3-D para la calibración de la cámara

### 4.5.1 Control visual virtual mono-imagen

En el control visual virtual mono-imagen, la calibración se lleva a cabo utilizando únicamente una imagen. Los parámetros intrínsecos iniciales considerados en la calibración son los proporcionados por el fabricante:  $(f_u, f_v) = (313, 301)$  mm y  $(u_0, v_0) = (154, 99)$  px. Con el objetivo de evaluar el comportamiento de la calibración empleando una única imagen, se ha obtenido la Tabla 4-1. Esta tabla indica los parámetros intrínsecos obtenidos desde diferentes posiciones iniciales de la cámara virtual. La cámara real está situada en la posición  $(3.68, 39.766, 303.374)$  mm, y en la orientación según los ángulos de Euler  $(\alpha, \beta, \gamma) = (2.97, 0.86, 1.57)$  rad. Las trayectorias obtenidas durante los diferentes experimentos de calibración se representan en la Fig. 4-4. Prácticamente todas las configuraciones iniciales llevan a obtener los parámetros intrínsecos de la cámara real, destacando que independientemente de la configuración inicial, el sistema de control visual virtual

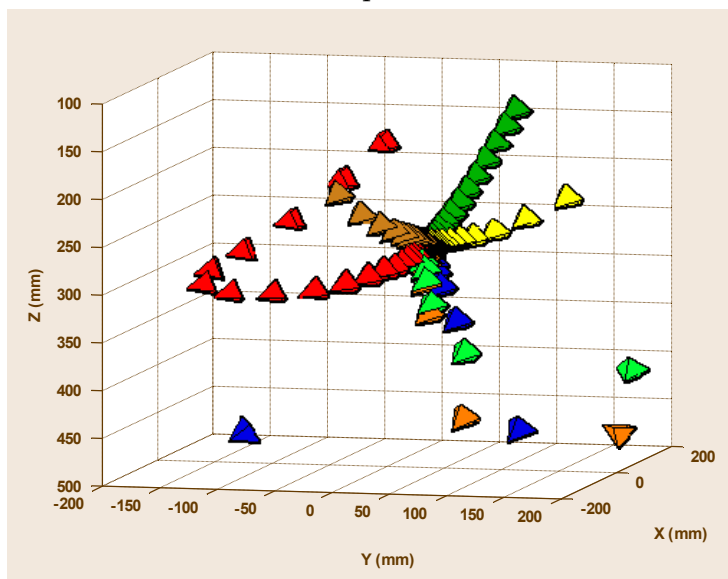


Fig. 4-4 Trayectorias 3-D en diferentes experimentos de calibración

permite obtener los parámetros extrínsecos reales.

En estos experimentos, se observa que los parámetros intrínsecos obtenidos varían según la posición inicial. Además, en la [Tabla 4-1](#) se puede observar un experimento en el que los parámetros intrínsecos obtenidos están muy lejos de los reales (ver la Prueba 9 marcada en gris). Esta prueba demuestra que los valores obtenidos en la obtención de los parámetros intrínsecos mediante control visual virtual no tienen la precisión requerida. Sin embargo, el método funciona perfectamente para calcular los parámetros extrínsecos, que es lo que realmente se necesita para el desarrollo del método de seguimiento intemporal de trayectorias en la imagen propuesto en el Capítulo 3 de la presente Tesis.

Tabla 4-1 Parámetros intrínsecos obtenidos en diferentes experimentos de calibración

Prueba	Posición inicial ( $p_x, p_y, p_z, \alpha, \beta, \gamma$ )	Parámetros intrínsecos obtenidos ( $f_u, f_v, (u_0, v_0)$ )
1	(116.47, 61.51, 252.8, 3.0522, 0.8165, 1.5206)	(399.52, 404.06), (167.13, 120.68)
2	(-61.93, 57.51, 252.8, 3.0522, 0.8165, 1.5206)	(398.73, 403.05), (164.82, 120.65)
3	(180.5, -10.49, 464.8, -2.9187, 0.0252, 1.7817)	(406.59, 415.34), (167.27, 119.98)
4	(-124.3, -5.69, 464.8, -2.8861, 0.9891, 1.8289)	(411.46, 422.99), (168.16, 120.22)
5	(78.07, 50.31, 171.2, 3.0522, 0.8165, 1.5206)	(412.72, 424.73), (170.37, 120.79)
6	(-29.13, 63.91, 202.4, -2.1540, 0.7652, 0.7585)	(406.06, 413.13), (170.3, 120.91)
7	(159.7, 119.9, 418.4, 2.5514, 0.4488, 1.9160)	(411.67, 422.84), (169.68, 121.65)
8	(34.07, 27.11, 160, 2.3255, 0.6177, 1.9713)	(412.88, 423.28), (169.41, 121.03)
9	(-130.7, 117.5, 418.4, 1.8827, 0.3372, 2.1547)	(905.66, 1053.23), (-203.84, -149.26)

En las secciones siguientes se detallan dos de estas pruebas:

- *Prueba 1.* Esta prueba funciona perfectamente, obteniendo parámetros de calibración cercanos a los reales. Sin embargo, estos resultados se deben mejorar.
- *Prueba 2.* Experimento en el que los parámetros extrínsecos e intrínsecos obtenidos no son correctos.

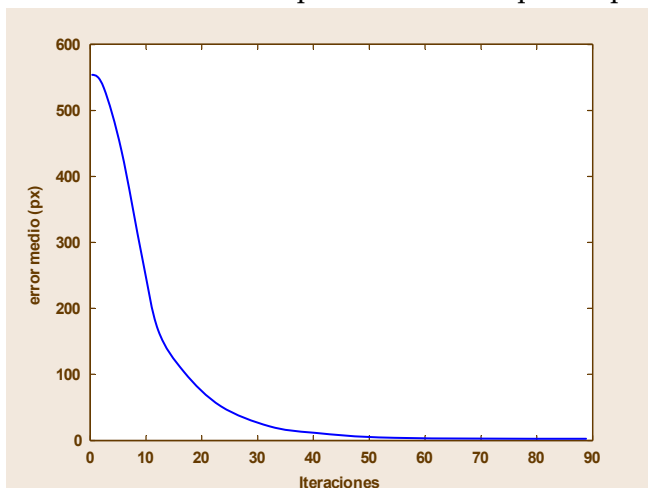


Fig. 4-5 Error medio en píxeles. Calibración mono-imagen. Prueba 1

#### 4.5.1.1 Prueba 1

Para observar el comportamiento de la calibración mediante control visual virtual, se pasa a presentar una descripción detallada del tercer experimento representado en la [Tabla 4-1](#). La [Fig. 4-5](#) muestra la evolución del error medio durante la tarea de control visual virtual. En este experimento se puede ver que el error decrece exponencialmente. La evolución de los parámetros intrínsecos se muestra en la [Fig. 4-6](#). Se representan

también en la Fig. 4-8 las acciones de control y la trayectoria de la cámara virtual durante la tarea. Los resultados de la calibración de la cámara son:  $(u_0, v_0) = (406.59, 415.34)$  px, y la distancia focal en las direcciones  $u$  y  $v$  son  $(167.27, 119.98)$  mm. Se puede observar que los parámetros intrínsecos calculados son muy próximos a los obtenidos usando los métodos de calibración clásicos off-line. Los parámetros extrínsecos obtenidos son: posición  $(9.95, 42.35, 302.3)$ mm, y orientación según los ángulos de Euler  $(\alpha, \beta, \gamma) = (2.98, 0.85, 1.57)$  rad. Es importante recalcar que los tiempos para obtener la convergencia total son despreciables (menores de 1 ms). Dado que se tiene la imagen, la convergencia se realiza con operaciones básicas, con lo que el tiempo de ejecución sólo depende de la velocidad del procesador.

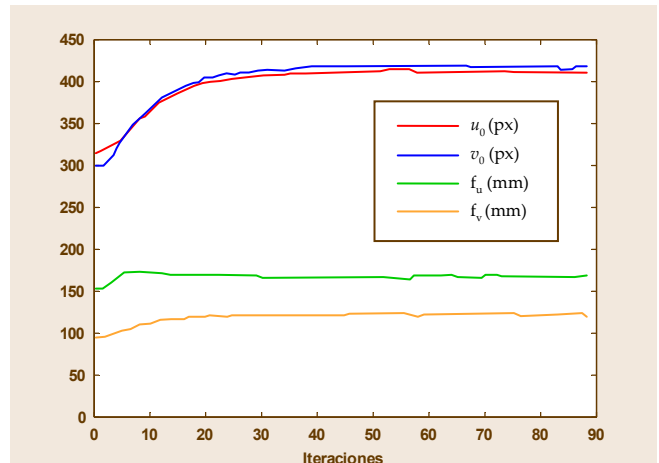


Fig. 4-6 Evolución de los parámetros intrínsecos. Calibración mono-imagen. Prueba 1

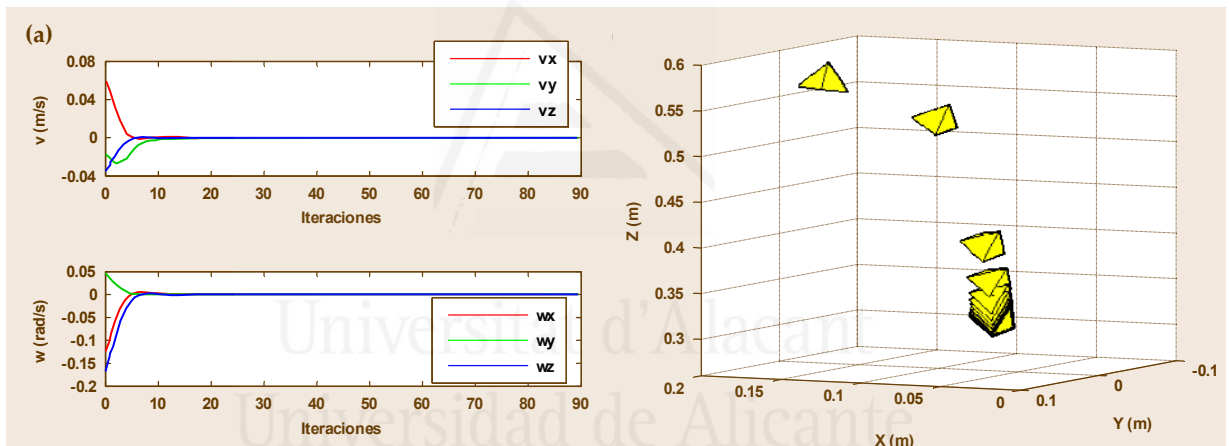


Fig. 4-7 Calibración mono-imagen. Prueba 1: (a) Velocidades traslacionales y rotacionales (b) Trayectoria de la cámara

En este primer experimento se puede observar que el método es válido para el cálculo de los parámetros extrínsecos de la cámara. Sin embargo, el método tiene problemas en la correcta calibración de los parámetros intrínsecos. Este tema ha sido estudiado en profundidad en [Pomares-2007a] y se soluciona con la calibración multi-imagen propuesta en el Apartado 4.3. La solución propuesta supone usar más de una imagen para obtener la calibración on-line.

#### 4.5.1.2 Prueba 2

Con respecto a la convergencia de la calibración, se puede afirmar que el sistema es capaz de converger cuando aparecen grandes errores en la inicialización. Por lo tanto,

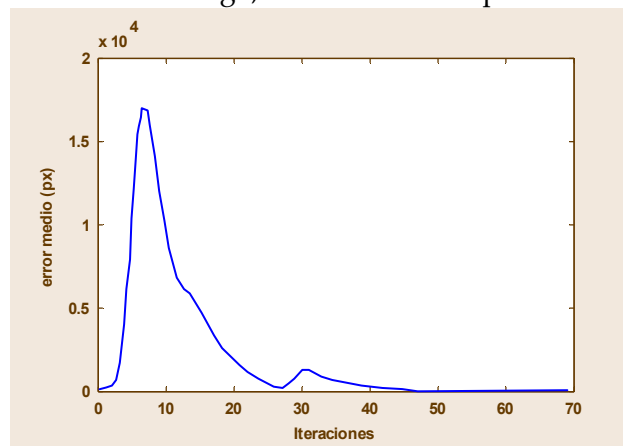


Fig. 4-8 Error medio en píxeles. Calibración mono-imagen. Prueba 2

se obtienen buenos parámetros extrínsecos, sin embargo, se ha observado que los parámetros intrínsecos obtenidos pueden variar dependiendo de los parámetros extrínsecos iniciales (ver [Tabla 4-1](#)). Por ejemplo, considerando los parámetros intrínsecos previamente mencionados, si la posición inicial de la cámara es (-130.7, 117.5, 418.4) mm y la orientación en ángulos de Euler (1.8827, 0.3372, 2.1547) rad, una vez que se desarrolla la tarea de control visual virtual, los parámetros intrínsecos que se obtienen son:  $(u_0, v_0) = (-203.843, -149.264)$  px y la distancia focal es igual a (905.661, 1053.23) mm. Los parámetros extrínsecos obtenidos son: posición (-307.25 -250.71 -800.56)mm, y la orientación en términos de ángulos de Euler  $(\alpha, \beta, \gamma) = (2.9, 0.41, -1.82)$  rad. En la [Fig. 4-7](#) y la [Fig. 4-9](#) se representa la evolución del error medio y de los parámetros intrínsecos.

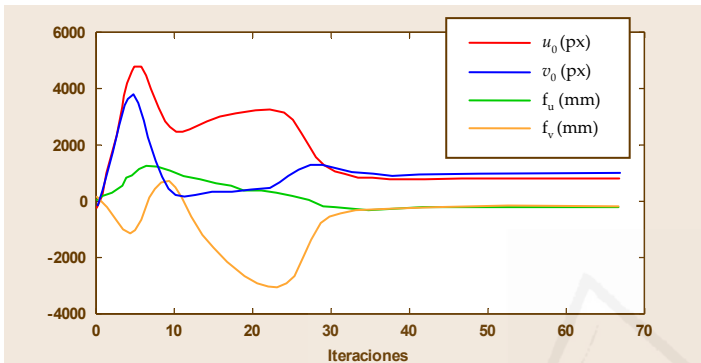


Fig. 4-9 Evolución de los parámetros intrínsecos. Calibración mono-imagen. Prueba 2

También se representan en la [Fig. 4-10](#) las acciones de control y la trayectoria de la cámara.

Como se observa en la [Fig. 4-9](#), durante la calibración pueden aparecer valores imposibles de los parámetros intrínsecos. En este momento la calibración debería acabar dando un error. Esto también ocurre en control visual clásico debido a la existencia de mínimos locales.

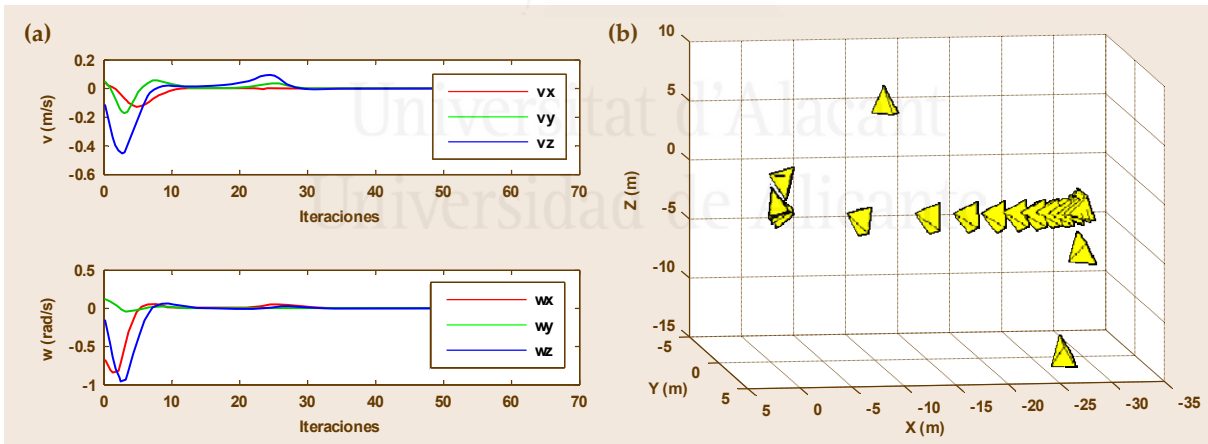


Fig. 4-10 Calibración mono-imagen. Prueba 2: (a) Velocidades traslacionales y rotacionales (b) Trayectoria de la cámara

### 4.5.2 Control visual virtual multi-imagen

La calibración utilizando más de una imagen permite solventar los problemas encontrados en los experimentos previos de calibración utilizando control visual virtual. Para demostrarlo, se considera el experimento presentado en el Apartado 4.5.1.2 y se incrementa el tamaño de la ventana de calibración. La [Tabla 4-2](#) muestra los parámetros intrínsecos obtenidos y el número de iteraciones necesarias para la convergencia dependiendo del tamaño de la ventana de calibración. Esta tabla presenta también el porcentaje de error en los parámetros extrínsecos obtenidos. En esta tabla se puede ver que cuanto mayor sea la ventana de calibración más iteraciones se necesitan para la

convergencia, sin embargo, la calibración es más precisa. De esta tabla se puede concluir que es necesario un tamaño de 6 de la ventana de calibración para obtener buenos resultados. Tal y como se describió al principio del Apartado 4.5, se ha empleado una cámara en configuración “*eye-in-hand*” que ha sido sometida a un proceso previo de calibración para estimar los parámetros intrínsecos: punto principal  $(u_0, v_0) = (168.75, 121.5)$  px, y la distancia focal en las direcciones  $u$  y  $v$   $(f_u, f_v) = (412.92, 423.69)$  mm.

**Tabla 4-2** Efecto de incrementar el número de imágenes para realizar la calibración

Tamaño de la ventana de calibración	Parámetros intrínsecos obtenidos $(f_u, f_v), (u_0, v_0)$	% error extrínsecos	Iteraciones
1	(905.661, 1053.23), (-203.843, -149.264)	3181.2	40
2	(7.89, 757.101), (-523.47, 204.48)	561	55
3	(409.96, 420.96), (166.8, 120.8)	41.6623	50
4	(410.38, 421.43), (164.37, 121.15)	14.4884	70
5	(411.58, 422.88), (166.73, 120.3)	8.15	90
6	(412.74, 423.28), (168.43, 121.33)	3.1	100
7	(412.93, 423.65), (168.54, 120.93)	3.6	110
8	(412.98, 423.78), (169.03, 121.55)	4.2	120

Para realizar la calibración usando la aproximación de control visual virtual multi-imagen se vuelve a emplear el objeto 3-D representado en la Fig. 4-3.(b) del que se pueden extraer 5 elipses. Para probar la correcta calibración con el método propuesto se han realizado las siguientes pruebas:

- Prueba 1. Ventana de calibración de tamaño 6. Este experimento muestra que, usando calibración multi-imagen, el sistema es capaz de converger en una situación en la que la calibración mono-imagen no funciona correctamente. Se ha ejecutado el mismo experimento desarrollado en la Prueba 2 de la Sección 4.5.1.2, esta vez usando calibración multi-imagen y se ha obtenido una correcta convergencia.
- Prueba 2. Ventana de calibración de 4. Se ejecuta usando calibración multi-imagen el mismo experimento anterior. Sin embargo, en este caso, el robot está ejecutando una tarea de control visual. En esta prueba se realiza una convergencia completa del control visual virtual en cada iteración del sistema de control visual. El sistema funciona perfectamente. En este experimento es posible observar que usando una ventana de calibración más pequeña, el sistema converge correctamente.
- Prueba 3. Experimento similar al anterior pero en el que se modifica el zoom de la cámara durante el seguimiento.

Con el objetivo de resumir los resultados obtenidos en los tres experimentos, en la siguiente tabla se representan los parámetros intrínsecos obtenidos.



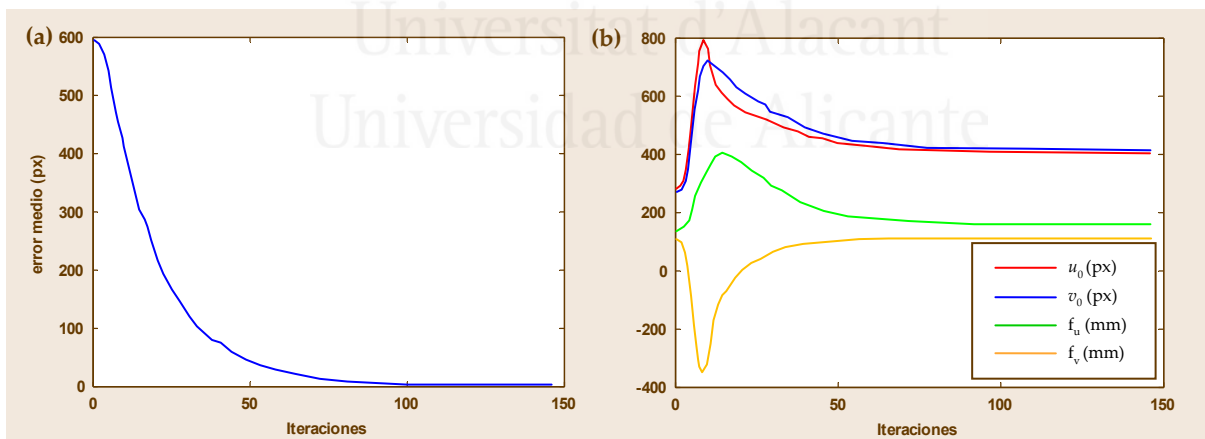
**Tabla 4-3** Parámetros intrínsecos obtenidos en las distintas pruebas realizadas con la aproximación de control visual virtual multi-imagen

Prueba	Parámetros intrínsecos obtenidos ( $f_u, f_v$ ), ( $u_0, v_0$ )
1	(412.74, 423.28), (168.43, 121.33)
2	(412.85, 423.45), (168.62, 121)
3	(944.9, 966.8), (155.5, 125)

#### 4.5.2.1 Prueba 1

En las pruebas realizadas con control visual virtual mono-imagen del Apartado 4.5.1 se pudo concluir que los parámetros intrínsecos obtenidos desde diferentes puntos de vista podían diferir cuando se realiza la calibración con una sola imagen. En este apartado, se desarrolla una calibración multi-imagen para integrar en un único proceso de calibración información obtenida de imágenes distintas. Como se ha descrito previamente, para incrementar la robustez del sistema de calibración se ha propuesto integrar la información de las imágenes obtenidas durante el proceso de control visual.

Para ilustrar la correcta convergencia de la calibración multi-imagen en situaciones en las que la mono-imagen no funciona correctamente se presenta a continuación de forma detallada la convergencia con 6 imágenes. En este experimento, se usan los parámetros extrínsecos e intrínsecos iniciales descritos en la prueba 2 de la Sección 4.5.1.2. Se ha obtenido la evolución del error y de los parámetros intrínsecos mostrada en la Fig. 4-11.



**Fig. 4-11** Calibración multi-imagen. Prueba 1: (a) Error medio en píxeles (b) Evolución de los parámetros intrínsecos

Los parámetros intrínsecos obtenidos son:  $(u_0, v_0) = (168.43, 121.33)$  px y la distancia focal igual a  $(412.74, 423.28)$  mm. Los parámetros extrínsecos obtenidos son: posición  $(4, 39.48, 303.58)$  mm y orientación según los ángulos de Euler  $(\alpha, \beta, \gamma) = (2.98, 0.86, 1.57)$  rad. Estos valores son muy próximos a los obtenidos usando los métodos de calibración off-line (ver la calibración de la cámara usando el método de Zhang). Sin embargo, la velocidad de convergencia ha disminuido. La acción de control y la trayectoria de la cámara durante la tarea también se representan en la Fig. 4-12.

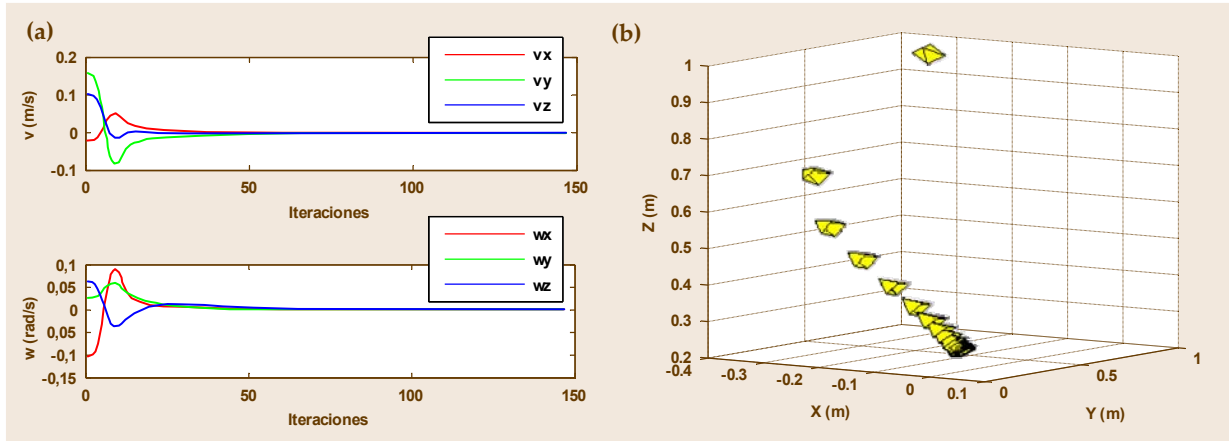


Fig. 4-12 Calibración multi-imagen. Prueba 1: (a) Velocidades lineal y rotacional (b) Trayectoria de la cámara

#### 4.5.2.2 Prueba 2

La prueba anterior destaca que integrando información de diferentes puntos de vista se obtiene una calibración más precisa. Ahora, se aplica control visual virtual en cada iteración de una tarea de control visual (se completa una convergencia del control visual virtual en cada iteración del control visual). De esta forma, en este caso las características deseadas del control visual virtual (es decir, las extraídas de la imagen) variarán durante la tarea. Este aspecto aporta al sistema mayor variedad de puntos de vista utilizados durante la calibración, permitiendo una calibración más precisa. Para demostrar esto último, se consideran los mismos parámetros extrínsecos e intrínsecos iniciales que en la Prueba 1 descrita en el apartado 4.5.2.1. Sin embargo, en este experimento, debido a la tarea de control visual, la cámara situada en configuración “eye-in-hand” (ver Fig. 4-3) está siguiendo la trayectoria 3-D mostrada en la Fig. 4-13. En esta figura se representan la trayectoria deseada y un muestreo de los parámetros extrínsecos durante la calibración.

La Fig. 4-14.(a) muestra la evolución del error cuando se consideran 4 imágenes (tamaño de la ventana de calibración) en la calibración multi-imagen durante la tarea de control visual. La Fig. 4-14.(b) muestra que durante la tarea de control visual la evolución de los parámetros intrínsecos de la cámara converge cerca de los deseados. En esta figura es posible observar que después de la primera ejecución del control visual virtual, los parámetros intrínsecos están cerca de la posición real, y luego oscilan alrededor de esta posición para cada nueva convergencia de control visual virtual. También se observa que los cambios en la posición de las características deseadas (y por lo tanto de los parámetros extrínsecos de la cámara) no producen cambios bruscos en los parámetros intrínsecos estimados. También se puede ver que los errores de calibración se han reducido en comparación con los errores de calibración obtenidos usando la misma ventana

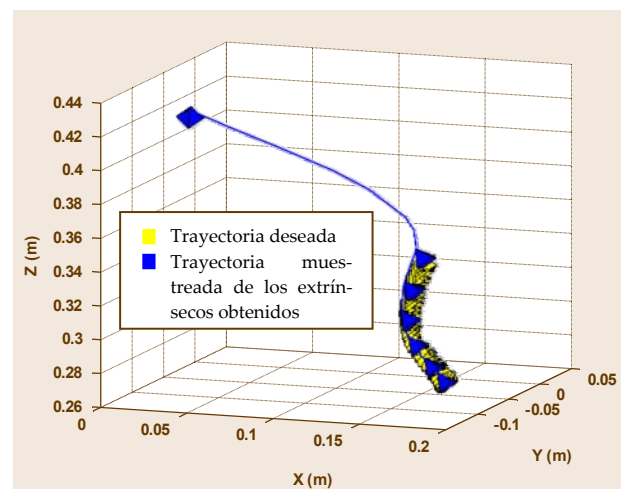


Fig. 4-13 Trayectoria de la cámara durante la tarea de control visual y parámetros extrínsecos obtenidos en la calibración on-line. Calibración multi-imagen. Prueba 2

de calibración y sin desarrollar una tarea de control visual (ver [Tabla 4-3](#)).

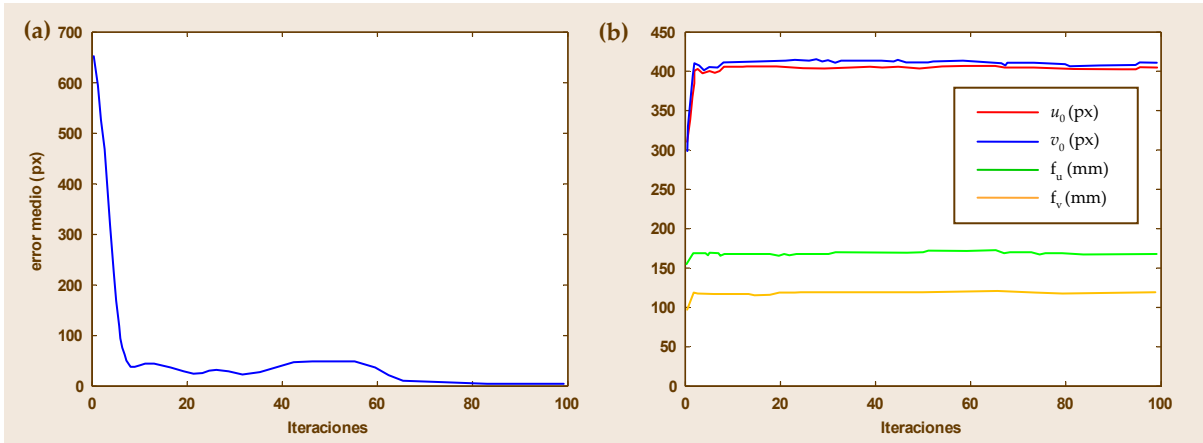


Fig. 4-14 Calibración multi-imagen. Prueba 2: **a)** Error medio en píxeles **(b)** Evolución de los parámetros intrínsecos

4.5

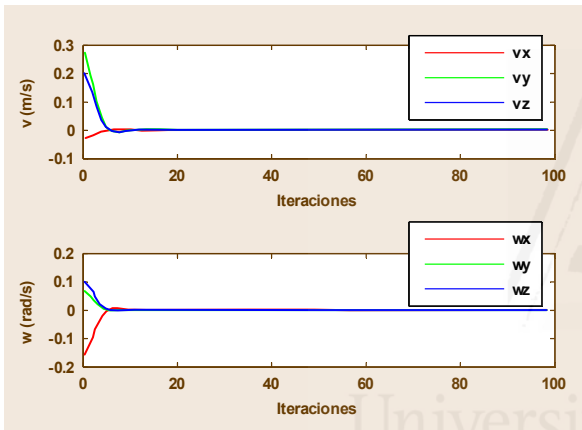


Fig. 4-15 Velocidades traslacionales y rotacionales. Calibración multi-imagen. Prueba 2

Los parámetros intrínsecos obtenidos son:  $(u_0, v_0) = (168.62, 121)$  px y la distancia focal igual a  $(412.85, 423.45)$  mm. Los parámetros extrínsecos obtenidos con el sistema de control visual son  $(51.09, 59.85, 390.967)$  mm y la orientación según los ángulos de Euler  $(\alpha, \beta, \gamma) = (2.97, 0.73, 1.57)$  rad. Una vez que la tarea de control visual virtual ha terminado se obtiene un error del 4.7% en los parámetros extrínsecos. Las acciones de control durante la calibración se muestran también en la [Fig. 4-15](#). Se puede concluir que usando conjuntamente control visual y control visual virtual

es posible obtener buenas calibraciones de los parámetros usando menores ventanas de calibración, por lo tanto, incrementando la velocidad de convergencia.

### 4.5.2.3 Prueba 3

Finalmente se presenta un experimento en el que los parámetros intrínsecos varían durante la tarea. En este caso, el robot está ejecutando la tarea de control visual descrita en el apartado anterior. Sin embargo, durante la tarea el zoom de la cámara varía. Se ha realizado una calibración de la cámara usando el método de Zhang [[ZhangZ-1999](#)] obteniendo:  $(u_0, v_0) = (156, 124.8)$  px y  $(f_u, f_v) = (526.5, 539.8)$  mm. Estos valores son los iniciales para el control visual virtual. En la [Fig. 4-16](#) se representan la evolución de los parámetros intrínsecos y del tamaño de la ventana de calibración durante la tarea. Una vez que la tarea de control visual termina, los parámetros intrínsecos obtenidos son:  $(u_0, v_0) = (155.5, 125)$  px y  $(f_u, f_v) = (944.9, 966.8)$  mm (calibrando la cámara al final de la tarea de control visual usando el método de Zhang, los parámetros intrínsecos obtenidos son:  $(u_0, v_0) = (156.2, 124.7)$  px y  $(f_u, f_v) = (945.4, 967.3)$  mm). El sistema es por lo tanto capaz de determinar correctamente el valor de la distancia focal cuando ésta varía durante la tarea.

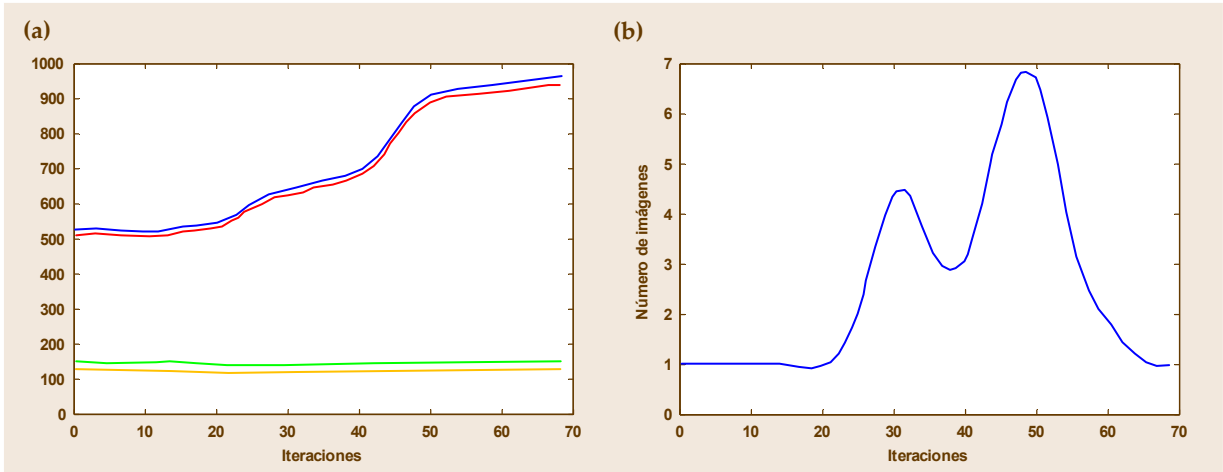


Fig. 4-16 Calibración multi-imagen. Prueba 3: (a) Evolución de los parámetros intrínsecos (b) Evolución del tamaño de la ventana de calibración

## 4.6 Conclusiones

Para obtener un buen comportamiento en los sistemas de control visual virtual, un aspecto importante es el uso de la calibración multi-imagen. Empleando únicamente calibración mono-imagen, los parámetros obtenidos en la calibración pueden diferir dependiendo de los parámetros extrínsecos iniciales. Además, se ha observado que usando sólo una imagen, el control visual virtual puede obtener parámetros en la calibración que pueden estar muy alejados de los reales. La calibración multi-imagen incrementa la robustez del sistema. Sin embargo, en esta última aproximación, un factor importante es la determinación del tamaño de la ventana de calibración. Cuanto más grande sea la ventana de calibración, más precisa será la calibración, necesitando por contra más iteraciones para la convergencia del sistema.

Este tipo de sistemas de control visual autocalibrado se puede emplear en situaciones en las que los parámetros intrínsecos varían durante la tarea. Usando esta aproximación, el sistema es capaz de adaptarse a posibles cambios en los parámetros de calibración de la cámara durante la tarea de control visual. Además, en cada momento, el sistema es capaz de determinar la posición de la cámara con respecto al objeto del que se extraen las características visuales.

Aplicando la técnica de calibración descrita en este Capítulo al seguimiento intemporal de trayectorias en la imagen basado en control visual virtual descrito en el Capítulo 3, se consigue un seguimiento mejorado al poder actualizar de forma precisa el Jacobiano de la imagen empleado en el control visual basado en imagen. Además, permite realizar el seguimiento incluso en condiciones en las que los parámetros intrínsecos varíen durante la tarea de seguimiento, como podría ser el caso de que la cámara de seguimiento realizara un zoom sobre la escena.

Por último, es importante destacar la alta velocidad del método de calibrado. Aunque se ejecute la calibración con más de una imagen, dado que estas imágenes ya han sido procesadas en cada iteración del bucle de control visual, sólo se invierte tiempo en realizar los cálculos para conseguir la convergencia.



Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante

## 5 Control visual directo para el seguimiento de trayectorias

Las tareas de control visual mostradas hasta el momento envían velocidades al extremo del robot para controlar sus movimientos. Para ello, se hace uso del controlador interno del robot, que traduce esas velocidades en el extremo a pares y fuerzas sobre las articulaciones. El control visual directo permite obtener directamente las fuerzas y pares a aplicar a cada articulación del robot. De esta forma, se elimina el retardo que introduce el uso de un controlador adicional como es el controlador interno del robot. El resultado es un control más rápido y preciso, ya que se reduce el tiempo de envío de órdenes al robot, lo que permite a éste reaccionar antes ante cambios bruscos de trayectorias.

El principal inconveniente en el diseño e implementación de controladores directos es la necesidad de conocer la dinámica del robot. Los parámetros necesarios para obtener la dinámica se obtienen de la fase de diseño de un robot y dependen entre otras cosas de la longitud, masa e inercia de los elementos que lo componen.

Enmarcado dentro del proyecto MCYT "Manipulación inteligente mediante percepción háptica y control visual empleando una estructura articular ubicada en el robot manipulador (DPI2008-

5.1	<b>Introducción</b> .....	123
5.2	<b>Control visual directo con un robot de 2 grados de libertad</b> ....	127
5.3	<b>Seguimiento intemporal de trayectorias en la imagen basado en control visual directo</b> .....	129
5.4	<b>Resultados de simulación</b> .....	131
5.4.1	Descripción del robot simulado .....	131
5.4.2	Esquema de control en Matlab/Simulink .....	133
5.4.3	Simulaciones de control visual directo basado en imagen .....	134
5.4.4	Simulaciones de seguimiento de trayectorias .....	135
5.5	<b>Conclusiones</b> .....	152

02647)" se pretende diseñar y construir un pequeño robot de 2 grados de libertad que se situará en el extremo de un robot Mitsubishi PA-10. En este capítulo se describe la simulación de un primer prototipo del robot de 2 grados de libertad en Matlab/Simulink. El conocimiento de los parámetros de diseño del robot permite obtener su dinámica y aplicar leyes de control visual directo para su control. A partir de este control visual directo se propone un sistema de seguimiento de trayectorias en la imagen que permite guiar al robot con un comportamiento intemporal.

### 5.1 Introducción

Como se ha desarrollado en los capítulos anteriores, los sistemas de control visual permiten el posicionamiento de un robot manipulador utilizando información visual.



Sin embargo, el uso de estos sistemas de control no permiten inicialmente el seguimiento de una determinada trayectoria. Proporcionan un posicionamiento punto a punto sin control alguno de las posiciones intermedias.

También se ha demostrado en el Apartado 2.2.4 que los sistemas de control visual basados en imagen son asintóticamente estables únicamente de manera local (es decir, son estables en aquellas condiciones en las que la posición inicial del robot y la deseada están muy próximas). Sin embargo, en desplazamientos largos, los errores en el cálculo de los parámetros intrínsecos de la cámara [Kim-2007], o en la estimación de las distancias al objeto [Malis-2003a] pueden llevar al sistema a un mínimo local [Chaumette-2006]. Una posible solución es alcanzar la posición final siguiendo una trayectoria deseada. El seguimiento de una trayectoria predefinida permite además evitar obstáculos fijos en el espacio de trabajo del robot. Esta trayectoria se muestrea, tomándose en cada momento una referencia distinta como deseada para el sistema. De esta forma, las posiciones actual y deseada se encuentran en todo momento muy cercanas, y el sistema aprovecha la estabilidad local del control visual basado en imagen.

En el Capítulo 3 se ha descrito un método de seguimiento de trayectorias en el espacio imagen llamado seguimiento intemporal de trayectorias basado en control visual virtual que permite aprovechar los beneficios mencionados de posiciones inicial y final muy cercanas [GarciaGJ-2007c, GarciaGJ-2009d]. Este método, que constituye una de las principales aportaciones de esta Tesis, permite realizar el seguimiento de trayectorias manteniendo una velocidad constante indicada por el usuario, asegurando que en todo momento la posición 3-D de la cámara presenta una configuración válida. Este sistema de seguimiento de trayectorias utiliza control visual indirecto basado en imagen clásico, en el que se asume que el robot es un dispositivo de posicionamiento perfecto. Este tipo de control no tiene en cuenta la dinámica del sistema, no siendo adecuado cuando el robot ejecuta movimientos rápidos y/o precisos.

Como se menciona en [Kelly-1996], hasta mediados de la década de los 90 fueron pocos los controladores propuestos basados en visión que tengan en cuenta la dinámica no lineal de los robots manipuladores. En estos últimos 15 años la tendencia sigue siendo la misma. Son pocos los trabajos donde se tiene en cuenta la dinámica del robot. Es decir, la mayoría de los controladores desarrollados se diseñan bajo la asunción de que el robot es un dispositivo de posicionamiento perfecto con una dinámica despreciable, lo que reduce el problema a un problema de control cinemático basado en las imágenes adquiridas por la cámara. El control visual dinámico es una técnica que permite obtener un comportamiento de alto nivel de los sistemas robóticos controlados por visión. La eliminación del lazo de control interno del robot permite un procesamiento de la imagen a una frecuencia muy elevada. Los trabajos existentes en la literatura en los que se describe el control visual dinámico de un robot tratan, en la mayoría de los casos, con robots con pocos grados de libertad. Uno de los primeros trabajos de control visual donde se tiene en cuenta la dinámica del robot es el realizado en [Miyazaki-1990]. El controlador propuesto por Miyazaki y Masutani se fundamenta en la aproximación de controlador basado en la Jacobiana traspuesta, técnica desarrollada por primera vez por Takegaki y Arimoto [Takegaki-1981]. El sistema de visión es modelado, sin embargo, como una simple transformación de rotación, no teniendo en cuenta la traslación. En [Bishop-1999] se desarrolla un esquema de control por dinámi-

ca inversa en el que se debe disponer de un conocimiento preciso de la dinámica del robot. Los controladores por dinámica inversa alcanzan el objetivo de seguimiento de trayectoria mediante la linealización por realimentación de la dinámica no lineal del robot. El controlador propuesto por Bishop y Spong permite indicar una trayectoria para el extremo del robot, sin embargo, la trayectoria deseada no está codificada en la imagen, sino en el espacio Cartesiano 3-D, ya que se realiza un control visual basado en posición. Kelly y Márquez [Kelly-1995] consideraron un modelo del sistema cámara-robot mucho más representativo que el propuesto en [Miyazaki-1990]. El sistema descrito sólo trata de resolver el problema del posicionamiento desde un punto a otro conocido. Este método resuelve los problemas surgidos de la necesidad de obtener los parámetros intrínsecos de la cámara, sin embargo, requiere conocer de manera precisa la orientación de ésta. Éste problema se resuelve en [Kelly-1996] donde se mejora el controlador propuesto en [Kelly-1995] para tener en cuenta la incertidumbre generada por la orientación de la cámara, permitiendo obtener una estabilidad asintótica local. El principal problema de los controladores desarrollados por Kelly et al. es que requieren un conocimiento exacto del término gravitacional del robot y que la diferencia entre las orientaciones estimada y actual de la cámara se restringe al intervalo  $(-90^\circ, 90^\circ)$ . Carelli et al. pretenden resolver en [Carelli-1994] el problema de errores cometidos en la estimación de los parámetros dinámicos del robot. Para ello emplean un controlador adaptativo que usa la información visual para compensar la incertidumbre de los parámetros dinámicos del robot. El controlador, basado en la dinámica inversa como el descrito en [Bishop-1999], utiliza la información visual directamente para controlar la posición relativa entre el robot y el objeto observado, es decir, es un control visual basado en imagen. Además, se demuestra la estabilidad asintótica local del método de control. Ya en la primera década del 2000, se sigue profundizando en la búsqueda de controles adaptativos que permitan resolver el problema de los errores cometidos en la estimación de los parámetros dinámicos. Así, Zergeroglu et al. diseñan un controlador adaptativo que tiene en cuenta la incertidumbre en la estimación de los parámetros del conjunto cámara-robot [Zergeroglu-2001]. Ya en 2008, Wu y Li describen otro controlador adaptativo que, teniendo en cuenta los parámetros dinámicos del robot trata de estimar en cada iteración los parámetros extrínsecos e intrínsecos de la cámara [Wu-2008].

El tiempo de adquisición de las imágenes, así como su procesamiento ha ido reduciéndose considerablemente durante la última década. Las aplicaciones a las que van destinados los controladores dinámicos basados en visión son aplicaciones que requieren alta velocidad y precisión. Es por ello que se elimina el controlador interno de los robots comerciales para poder actuar directamente sobre los motores de las articulaciones. El retardo que introduciría un sistema de visión lento en un controlador directo de este tipo haría inútil el esfuerzo realizado para su diseño e implementación. Para solucionar este problema, Schuurman et al. proponen el uso de múltiples cámaras fijas observando el área de trabajo del robot [Schuurman-2004]. Las cámaras se sincronizan de forma que siempre se tenga una imagen en un tiempo de muestreo predefinido. El empleo de múltiples cámaras también permite en cierta medida resolver problemas de oclusiones. Fei et al. resuelven el problema de los retardos introducidos por el sistema de visión con un estimador de movimiento basado en redes neuronales que proporcione muestras intermedias [Fei-2006].

Más recientemente, la inclusión de observadores permite predecir el movimiento de los objetos. En [PerezRR-2009] se hace uso de una cámara fija que observa un robot trabajando sobre un plano cuya tarea es realizar el seguimiento y agarre de objetos en movimiento. Cid et al. [Cid-2008] describen una metodología para diseñar sistemas de control visual basado en posición para robots de 2 grados de libertad que trabajan sobre un plano con cámara fija. Los trabajos previos desarrollados por Kelly et al. se amplían en [Kelly-2006] al generalizar la aproximación de control basado en Jacobiana traspuesta al control visual de manipuladores que no trabajen únicamente en un plano. El robot donde se prueba el controlador propuesto es una muñeca esférica que permite realizar orientaciones en el espacio Cartesiano 3-D, pero no traslaciones. Incrementando el número de grados de libertad controlados, Sauvee et al. diseñan un controlador visual directo basado en imagen para un robot de 6 grados de libertad [Sauvee-2006]. Al obtener los pares y fuerzas que se deben enviar al robot, se resuelven los problemas de visibilidad, saturación de los actuadores y límites de las articulaciones. A partir de una función de coste se aplica un controlador predictivo sobre el modelo no lineal de la dinámica del robot. El sistema se ha probado únicamente en simulaciones.

La mayoría de los trabajos mencionados anteriormente realizan el control con una configuración de cámara fija. Borangiu et al. describen el controlador directo de robots de tipo Scara con cámara en las dos configuraciones: fija y en el extremo [Borangiu-2003]. En [PerezC-2006a] se describe el control visual directo de un robot cartesiano con cámara en el extremo. Al no tener que controlar los grados de libertad de la orientación de la cámara, se reduce la complejidad del controlador, permitiendo resolver el control visual teniendo en cuenta los parámetros dinámicos no lineales del robot. Los trabajos realizados en la construcción y puesta en marcha del robot paralelo RoboTennis [Angel-2005, Angel-2008] describen su control visual dinámico. A pesar de presentar una configuración de cámara montada en el extremo, el controlador visual está basado en posición. En el presente Capítulo se utiliza el control visual basado en imagen, que presenta un comportamiento más estable que el basado en posición ante malas calibraciones de los parámetros intrínsecos de la cámara. En este aspecto destacan los trabajos de Wang et al [Wang-2008], que tratan de resolver el control visual de un robot con 3 grados de libertad (en adelante gdl) a partir de un algoritmo adaptativo que actualiza el valor de la distancia de la cámara al objeto en cada iteración, obteniendo así una matriz de interacción independiente de la distancia. Sin embargo, se quiere simular un control visual basado en imagen básico, capaz de aportar a partir del error en imagen qué pares y fuerzas hay que aplicarles a las articulaciones. Los trabajos de Kelly et al [Kelly-2000] son en este sentido más parecidos al objetivo que se pretende alcanzar, ya que en este artículo se trata el control visual dinámico de un robot de 2 gdl. El controlador propuesto no requiere el cálculo de la posición final en articulares ya que al igual que se pretende resolver aquí, se hará uso de la posición final deseada del objeto en el plano imagen para minimizar el error. Siguiendo la línea descrita por Kelly, en [Sequeira-2003] Sequeira et al. proponen una mejora del controlador dinámico propuesto en [Kelly-2000], calculando en cada iteración la rotación de la cámara, permitiendo su uso en configuraciones “*eye-in-hand*”.

Aunque se puede encontrar un gran número de trabajos relacionados con el control visual directo, no es menos cierto que la gran mayoría de las investigaciones en control visual no tienen en cuenta la dinámica del robot. Los artículos que sí incluyen

los parámetros dinámicos del robot en el controlador suelen tratar con robots de pocos grados de libertad dado la complejidad de estimar sus parámetros dinámicos. En general, se utiliza una configuración de cámara fija observando tanto el extremo del robot como el objeto sobre el que se quiere posicionar a éste. Sólo unos pocos artículos presentan una aproximación de control visual basado en imagen, y ninguno de los artículos estudiados permiten realizar un seguimiento de una trayectoria predefinida en el espacio imagen, ni mucho menos con un comportamiento intemporal.

En el presente Capítulo se presentan tres métodos de seguimiento de trayectorias en la imagen que, presentando un comportamiento intemporal, utilizan un controlador visual directo que permite obtener los pares y fuerzas necesarios para guiar al robot. Para la simulación del seguimiento de trayectorias basado en control visual dinámico se hace uso de los bloques de Simulink que proporcionan las Robotic toolbox de Matlab [Corke-1996] y la Visual servoing toolbox de Matlab [Cervera-2002a]. El entorno de Matlab / Simulink con las dos toolbox descritas permite diseñar e implementar nuevos métodos de control de forma sencilla [Mei-2009]. Mei et al. utilizan este entorno para desarrollar un controlador visual dinámico para un robot de 2 gdl. Se simula un robot de 2 gdl, en el que se aplican los métodos descritos en los siguientes apartados.

## 5.2 Control visual directo con un robot de 2 grados de libertad

Tal como se ha mencionado en la sección anterior, la mayoría de trabajos relacionados con el control visual de un robot manipulador sólo tiene en cuenta las características cinemáticas del robot. El objetivo en estos controladores es obtener las velocidades que muevan la cámara hasta la posición deseada. Es el controlador interno del robot manipulador el que se encarga entonces de buscar los pares y fuerzas que se le deben transmitir a las articulaciones del robot para conseguir esas velocidades que en cada iteración calcula el controlador visual. Un control visual directo elimina este paso, de forma que es el propio controlador visual quien calcula y envía los pares y fuerzas que deben guiar al robot hacia la posición requerida. El resultado es un control mucho más rápido y preciso. El principal inconveniente de estos controladores es que se debe trabajar directamente con los parámetros dinámicos no lineales del sistema robótico. Cuando se diseña un robot, se conocen de forma precisa sus parámetros dinámicos (masas, localización del centro de gravedad, términos de inercia y parámetros de fricción). Sin embargo, estos parámetros son desconocidos en la mayoría de robots industriales de carácter comercial. En ausencia de fricción u otras perturbaciones, la dinámica de un robot manipulador puede escribirse como [Spong-1989]:

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}) = \boldsymbol{\tau}, \quad (5.1)$$

donde  $\mathbf{q} \in \mathbb{R}^{n \times 1}$  es la configuración articular,  $\dot{\mathbf{q}} \in \mathbb{R}^{n \times 1}$  representa las velocidades articulares y  $\ddot{\mathbf{q}} \in \mathbb{R}^{n \times 1}$  las aceleraciones articulares,  $\boldsymbol{\tau} \in \mathbb{R}^{n \times 1}$  es el vector de fuerzas y pares articulares aplicados,  $\mathbf{M}(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$  es la matriz de inercia (simétrica y definida positiva),  $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} \in \mathbb{R}^{n \times 1}$  es el vector de pares y fuerzas de Coriolis y  $\mathbf{g}(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^{n \times 1}$  es el vector de fuerzas y pares gravitacionales.

El control visual descrito en [Kelly-2000] es un control visual basado en imagen, dado que la tarea del robot se especifica en el plano imagen en términos de los valores de las características de la imagen correspondientes a las posiciones relativas entre el robot y el objeto. La aproximación que se sigue en [Kelly-2000] viene motivada por la filosofía de control de Jacobiana traspuesta introducido en [Takegaki-1981]. La ley de control propuesta viene dada por:

$$\tau = \mathbf{J}(\mathbf{q}, \mathbf{s}, \mathbf{Z})^T K_p \mathbf{e} - K_v \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}), \quad (5.2)$$

donde  $K_p \in \mathbb{R}^{2M \times 2M}$  y  $K_v \in \mathbb{R}^{n \times n}$  son las constantes proporcional y derivativa respectivamente. Estas constantes son matrices simétricas definidas positivas elegidas por el diseñador del controlador,  $M$  es el número de características del objeto en la imagen y  $n$  es el número de articulaciones del robot.

Dentro del primer término de (5.2)  $\mathbf{e} = (\mathbf{s} - \mathbf{s}_d)$  es el error en imagen, siendo  $\mathbf{s}_d$  el conjunto de características de la imagen en la posición deseada del robot respecto al objeto y  $\mathbf{s}$  el conjunto de las características de la imagen en la iteración actual.  $\mathbf{J}(\mathbf{q}, \mathbf{s}, \mathbf{Z})^T$  se define como la traspuesta de la matriz Jacobiana, que en [Kelly-2000] se define como:

$$\mathbf{J}(\mathbf{q}, \mathbf{s}, \mathbf{Z}) = \mathbf{L}_s(\mathbf{s}, \mathbf{Z}) \cdot \mathbf{J}_g(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^{2M \times n}, \quad (5.3)$$

donde  $\mathbf{L}_s(\mathbf{s}, \mathbf{Z}) \in \mathbb{R}^{2M \times 6}$  es la Jacobiana de la imagen para las características elegidas [Hashimoto-1992] y depende de la posición actual de las articulaciones del robot, ya que se emplea una configuración eye-in-hand (en el Capítulo 2 se muestra cómo se calcula esta Jacobiana o matriz de interacción tanto para puntos como para elipses); y  $\mathbf{J}_g(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^{6 \times n}$  es el Jacobiano del robot en su extremo [Sciavicco-2000] (también se calcula a partir de la posición actual de las articulaciones):

$$\begin{bmatrix} v_c \\ \omega_c \end{bmatrix} = \mathbf{J}_g(\mathbf{q}) \cdot \dot{\mathbf{q}}. \quad (5.4)$$

El segundo término de (5.2) ( $-K_v \dot{\mathbf{q}}$ ) se corresponde con la acción derivativa y requiere que se disponga en cada iteración de las velocidades de las articulaciones del robot,  $\dot{\mathbf{q}}$ . Mientras que el término  $\mathbf{g}(\mathbf{q})$  es el término de pares gravitacionales del modelo dinámico del robot. Será, por tanto, necesario su cálculo para obtener los pares y fuerzas a aplicar al robot para minimizar el error en imagen. Este término de la dinámica del robot depende únicamente de la posición actual de las articulaciones,  $\mathbf{q}$ .

El controlador mostrado en (5.2) presenta una estabilidad asintótica local. En [Kelly-2000] se realiza un estudio completo de esta estabilidad utilizando el método directo de Lyapunov. Como se detalla en el Capítulo 3, el problema asociado al hecho de no poder demostrar la estabilidad asintótica global del controlador puede resolverse utilizando un seguimiento de trayectorias en la imagen, donde las referencias estén muy próximas unas a otras. No se ha encontrado ninguna referencia donde se describa algún sistema de seguimiento de trayectorias en la imagen utilizando un controlador visual directo. A continuación se describirá un método que permite realizar el seguimiento de trayectorias en la imagen a partir del controlador dinámico (5.2).



### 5.3 Seguimiento intemporal de trayectorias en la imagen basado en control visual directo

Al igual que ocurría con los sistemas de control visual indirecto basado en imagen, los sistemas de control visual directo basado en imagen presentan el problema de mínimos locales en desplazamientos muy largos de la cámara. Este problema se ha resuelto con la propuesta de un método de seguimiento intemporal de trayectorias en el espacio imagen [García-2007c, García-2009d] (ver Sección 3.5). Este método basado en control visual indirecto permite realizar el seguimiento de una trayectoria predefinida con una velocidad deseada. La idea básica del sistema de seguimiento descrito en el Apartado 3.5 es implementar un bloque que vaya modificando las características visuales de referencia para un controlador visual basado en imagen clásico. La propuesta para obtener un sistema de seguimiento con control visual directo es la misma. Partiendo de un controlador directo basado en imagen como el descrito en [Kelly-2000] se construye un bloque que proporcionará en cada iteración la referencia dentro de la trayectoria deseada.

La idea que se plantea resuelve el problema de los métodos con comportamiento temporal. Estos métodos no permiten que el robot interactúe con el entorno, ya que ante una obstrucción en el seguimiento de la trayectoria, las referencias (que dependen del tiempo) se van perdiendo. De esta forma, cuando cesa la obstrucción, estos métodos de seguimiento temporales no permiten continuar con el seguimiento desde el punto en el que comenzó la obstrucción. Este efecto indeseado se resuelve haciendo que las referencias no dependan del tiempo.

Para ello, se obliga a que las referencias sólo dependan de la posición actual de la cámara,  $\mathbf{e} = (\mathbf{s} - \mathbf{s}_a(\mathbf{q}))$ . Así, la siguiente referencia a visitar de la trayectoria se calcula a partir de la posición actual y no del tiempo desde que se inició el seguimiento. Para calcular la referencia siguiente se siguen tres aproximaciones distintas resultantes de la mejora sucesiva del método en búsqueda de un controlador dinámico similar al controlador intemporal para el seguimiento de trayectorias descrito en el Capítulo 3.

En la primera aproximación del método de seguimiento intemporal se comprueba el error en píxeles hasta la siguiente referencia no visitada [GarcíaGJ-2009c]. Si este error es menor que un umbral ( $\text{error} < \epsilon$ ), se da esa posición de la trayectoria como visitada, consultándose la siguiente referencia (ver Fig. 5-1). Sólo en el momento en que el umbral de error se supere, se tendrá la siguiente referencia para el controlador visual dinámico. Esta referencia será la posición deseada  $\mathbf{s}_a$  en el esquema de control (5.2). Con este sistema de búsqueda de la referencia de control para el sistema de seguimiento se consigue mantener una velocidad mínima, evitando los efectos de movimiento y parada entre las referencias de la trayectoria que surgirían al implementar el controlador sin este bloque de búsqueda de la siguiente referencia (ver Fig. 3-2). El sistema, sin embargo, no permite definir una velocidad constante de seguimiento, dado que para la obtención de las características deseadas no se tiene en cuenta la velocidad como se hacía en el método propuesto con control visual indirecto. A lo largo del resto del Capítulo, se hará referencia a este método como “método de umbral de error”.



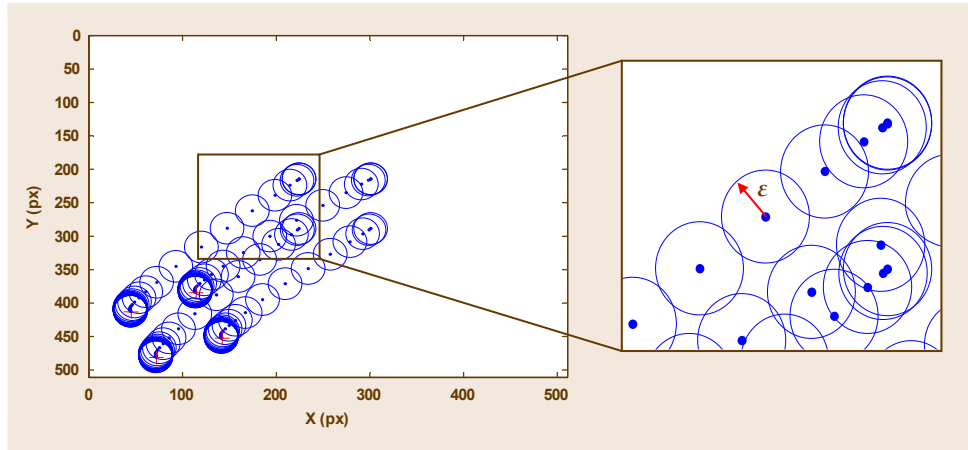


Fig. 5-1 Umbral de error permitido en la búsqueda de la siguiente referencia en el método de umbral de error

La segunda aproximación trata de mejorar el método de umbral de error al permitir asegurar una velocidad mínima durante el seguimiento. Para ello, se modifica el bloque que permite encontrar la siguiente referencia para el controlador dinámico. El esquema de búsqueda es similar al descrito en el Apartado 3.5. A partir de la posición actual de las características en la imagen,  $\mathbf{s}$ , se itera sobre el vector  $T$  que contiene los  $N$  conjuntos de características que almacenan la trayectoria deseada,  $T = \{^k \mathbf{s} / k \in 1..N\}$ .

Para cada conjunto  $^k \mathbf{s}$ , se calcula la velocidad que aplicaría el controlador para llegar desde la posición actual de las características en la imagen  $\mathbf{s}$ . Cuando la velocidad calculada para un conjunto de características  $k$  supera la velocidad deseada (es decir,  $|^k v| > |v_d|$ ) se tendrá el conjunto de características deseadas para el controlador dinámico descrito en el Apartado 5.2. La Fig. 5-2 esquematiza el proceso de búsqueda de las características deseadas para esta segunda aproximación. La ventaja añadida sobre el método de umbral del error de esta segunda aproximación es que asegura una velocidad mínima deseada, dado que en cada momento se está buscando el conjunto de características dentro de la trayectoria que aseguran que se supera esta velocidad deseada. En adelante, esta segunda aproximación se referenciará como “método de velocidad mínima”.

La última aproximación trata de garantizar una velocidad deseada constante durante el seguimiento. Las aproximaciones propuestas hasta el momento no han permitido asegurar una velocidad de seguimiento durante toda la tarea. El método de umbral de error impide acciones de movimiento y parada durante la tarea al definir un área en imagen alrededor de cada referencia que permite ir hacia delante en la trayectoria sin tener que llegar a parar en la referencia actual. El método de velocidad mínima sí que resuelve el problema de mantener una velocidad mínima durante el seguimiento. Sin embargo, la velocidad deseada no se mantendrá constante salvo en casos muy particulares donde al menos las referencias estén siempre a la misma distancia. La última aproximación, que será referenciada a partir de ahora como “método de velocidad constante” parte del conjunto de características  $^k \mathbf{s}$  encontrado tras aplicar el algoritmo descrito en la Fig. 5-2. A partir de esta  $k$ -ésima referencia de la trayectoria  $T$ , y de la referencia anterior (la  $k-1$ ), se interpolará en busca de las características en imagen que aseguran la velocidad deseada durante el seguimiento. Esta interpolación se ha

descrito ya en el Capítulo 3, dado que el método de seguimiento de trayectorias en la imagen basado en control virtual descrito en el Apartado 3.5 emplea la misma técnica para asegurar la velocidad de seguimiento requerida (ver Fig. 3-23).

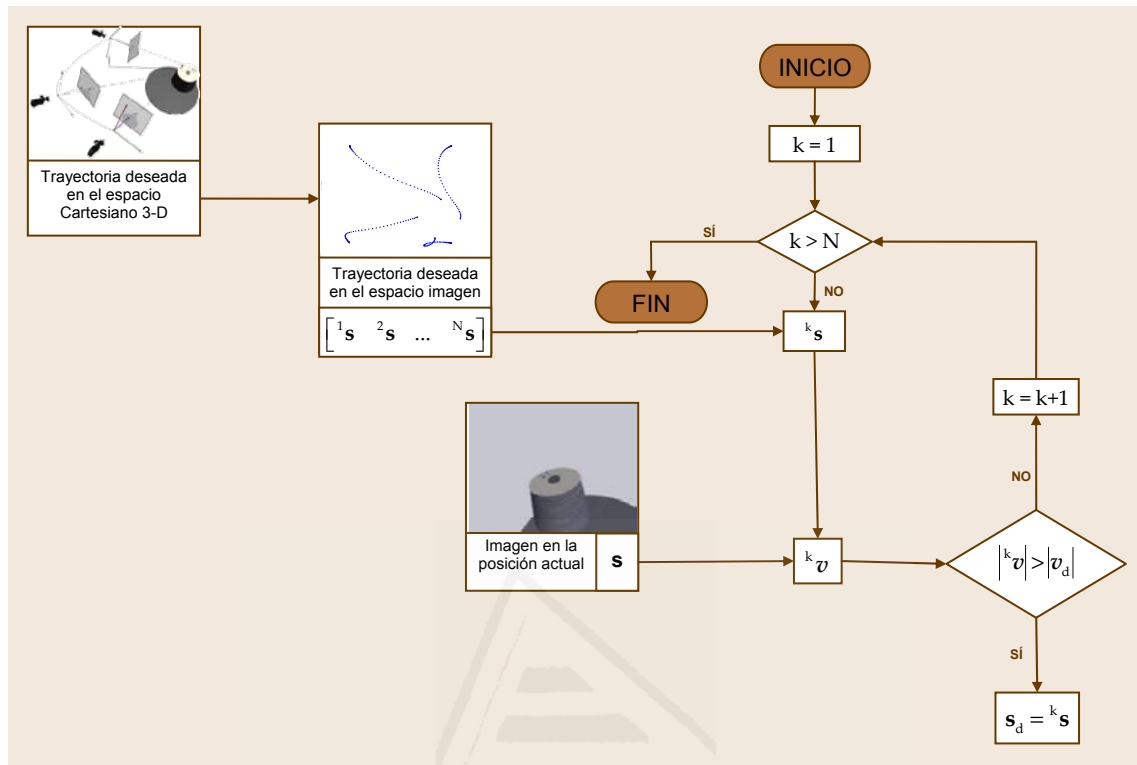


Fig. 5-2 Esquema del algoritmo de búsqueda del primer conjunto de características dentro de la trayectoria deseada que excede la velocidad requerida utilizado en el método de velocidad mínima y el método de velocidad constante

## 5.4 Resultados de simulación

### 5.4.1 Descripción del robot simulado

Las distintas pruebas presentadas en este Capítulo se enmarcan dentro del proyecto del MCYT “Manipulación inteligente mediante percepción háptica y control visual empleando una estructura articular ubicada en el robot manipulador (DPI2008-02647)”. La finalidad del proyecto es la investigación en técnicas de manipulación inteligentes. Para ello se abordará, por un lado, el desarrollo de estrategias de control visual para el guiado de robots empleando para ello una cámara ubicada en una estructura articular anclada en el extremo del robot manipulador. Así, se requerirá el diseño de este mini-robot y el desarrollo de estrategias de control visual directo con el objetivo de asegurar que, durante toda la tarea llevada a cabo por el manipulador, la información visual requerida se encuentra en el campo de visión de la cámara.

El diseño y construcción de un robot es una tarea compleja en la que se deben tener en cuenta multitud de variables. Sin embargo, las ventajas derivadas del conocimiento preciso de los materiales de construcción, la disposición de los eslabones y sus dimensiones reducen la complejidad a la hora de definir un controlador dinámico. El robot que se pretende construir se situará en el extremo de un Mitsubishi PA-10 como el

mostrado en la Fig. 3-24. Su principal misión será la de buscar un mejor ángulo de visión en tareas de manipulación, donde las herramientas situadas en el extremo del Mitsubishi PA-10 puedan provocar oclusiones que impidan la ejecución de la tarea. Un aspecto importante del diseño del robot es la prueba de los controladores que se pretenden implementar en el robot real. Para ello, se simulan previamente estos controladores en entornos como Matlab/Simulink. La Fig. 5-3 muestra un primer prototipo del mini-robot obtenido en la fase de diseño del proyecto MCYT comentado.

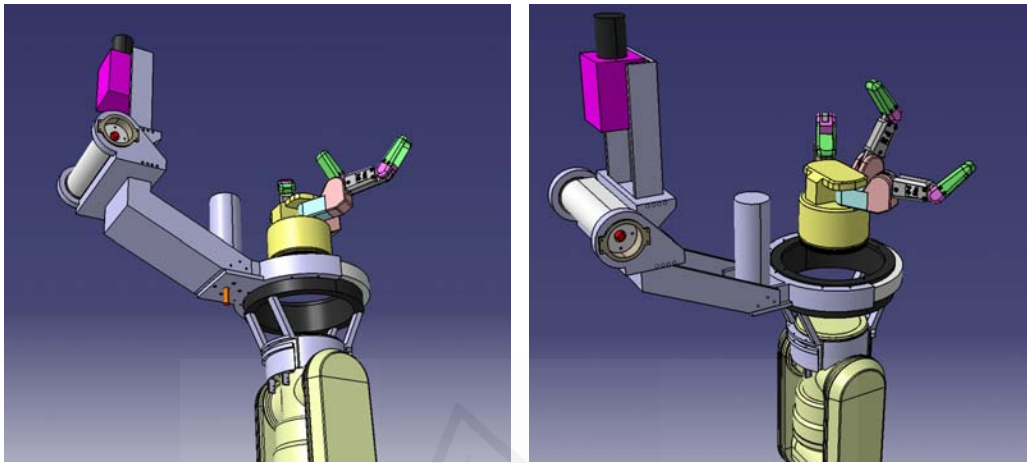


Fig. 5-3 Prototipo de robot de 2 gdl diseñado en el marco del proyecto MCYT DPI2008-02647

Partiendo del primer prototipo mostrado en la Fig. 5-3, se diseña un modelo simplificado para introducirlo en Matlab/Simulink. Este modelo dispone de 2 articulaciones rotacionales tal como muestra la Fig. 5-4.(a). El primer eslabón es de 15 cm y su masa es de 0,5 Kg. El segundo eslabón mide 20 cm y pesa 1,2 Kg contando el peso de la cámara situada en su extremo.

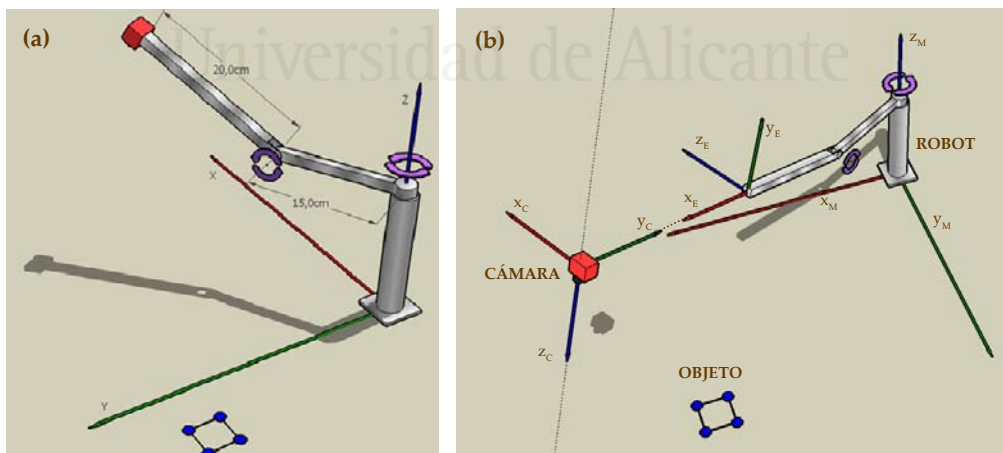


Fig. 5-4 Robot de 2 gdl sobre el que se realizan las pruebas de seguimiento (a) Medidas de los eslabones y configuración de la cámara en el extremo (b) Ejes de los distintos sistemas

La cámara se ha situado en su extremo mirando hacia abajo. A partir de la posición de los ejes en su extremo se calcula la transformación de la cámara para situarla orientada de forma correcta (ver Fig. 5-4.(b)). La transformación,  ${}^0T_c$ , es la siguiente:

$${}^c\mathbf{T}_e = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (5.5)$$

#### 5.4.2 Esquema de control en Matlab/Simulink

Utilizando las toolbox de Robotics [Corke-1996] y de Visual servoing [Cervera-2002a] para Matlab se ha creado en Simulink el bucle de control dinámico descrito en (5.2). La Fig. 5-5 muestra el esquema general de bloques de Simulink para los métodos de seguimiento de trayectorias en la imagen descritos en el Apartado 5.3. La diferencia entre los tres métodos se encuentra en el contenido del bloque de búsqueda de las características deseadas en la trayectoria.

A partir de la posición de las articulaciones,  $\mathbf{q}$ , se calcula la Jacobiana del robot en el extremo. El primer término del controlador descrito en la Sección 5.2,  $\mathbf{J}(\mathbf{q}, \mathbf{s}, \mathbf{Z})^T \mathbf{K}_p \mathbf{e}$ , se calcula a partir de esta Jacobiana. Se multiplica por la Jacobiana de la imagen, se calcula la traspuesta de este producto y se multiplica todo por  $\mathbf{K}_p$  y por el error en la imagen.  $\mathbf{K}_p$  es una matriz simétrica que se ha ajustado en simulación para evitar oscilaciones al tiempo que se permita obtener un control más o menos rápido.

El segundo término del controlador,  $-\mathbf{K}_v \dot{\mathbf{q}}$ , se obtiene multiplicando la velocidad de las articulaciones que nos proporciona la dinámica directa por la matriz  $\mathbf{K}_v$ . Esta matriz también se debe ajustar en simulaciones para obtener una respuesta adecuada del controlador.

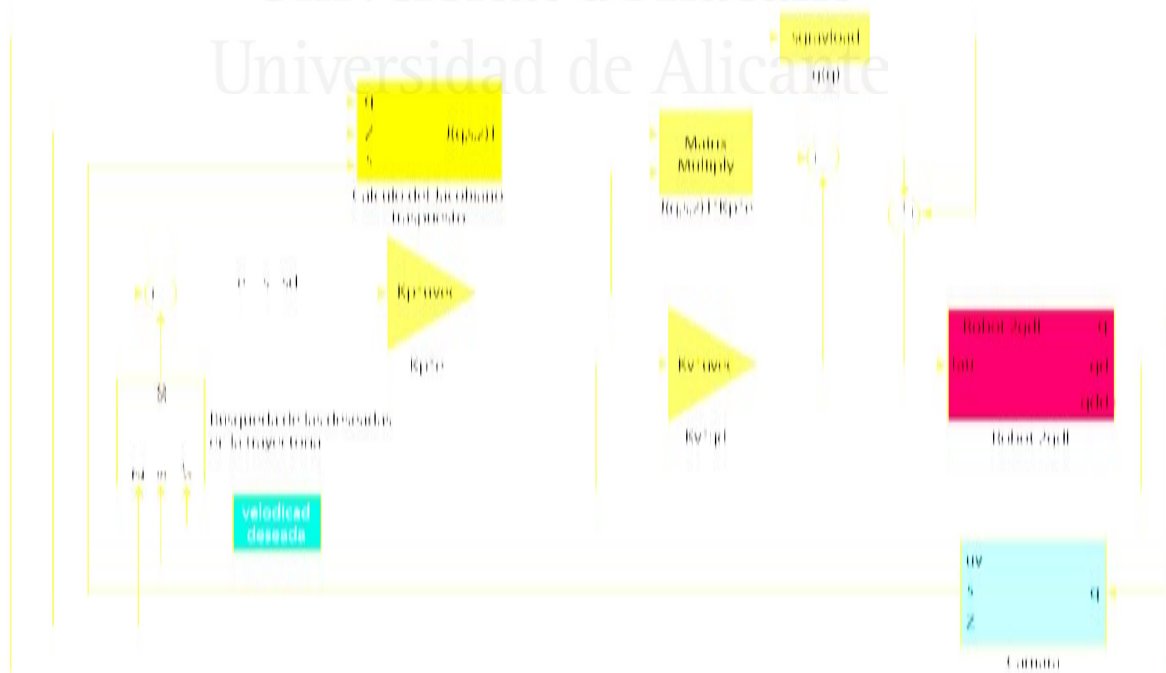


Fig. 5-5 Esquema general del controlador dinámico en Matlab / Simulink

El último término correspondiente al par gravitacional,  $\mathbf{g}(\mathbf{q})$ , se calcula a partir de  $\mathbf{q}$ . Para obtenerlo se hace uso de la función gravload que proporciona la Robotics toolbox. Esta función recibe como parámetros el robot y su posición articular para devolver los pares gravitacionales correspondientes a la configuración indicada [Walker-1982]. Se ha creado una s-function para poder llamar a la función desde Simulink.

### 5.4.3 Simulación de control visual directo basado en imagen

Antes de evaluar los distintos métodos de seguimiento de trayectorias en la imagen con control visual dinámico, se prueba el controlador en una tarea de posicionamiento. Tal como se observa en la Fig. 5-4, las características del objeto para la tarea de control visual son 4 puntos. Estos 4 puntos forman un cuadrado de 0.06 m de lado, cuyo centro está situado en el punto (0.35, 0, -0.8) m. El objeto permanece quieto durante las tareas de control.

Esta simulación parte del robot en su posición inicial, esto es, sus dos articulaciones giradas 0 rad. Esta posición inicial sitúa los puntos en la imagen según  $\mathbf{s} = [219 \ 219, \ 294 \ 219, \ 294 \ 219, \ 219 \ 294]$  px. Desde esta posición se pretende girar la primera articulación -0.4 rad y la segunda 0.15 rad. A partir de esta posición, la posición final de los puntos en la imagen se corresponde con  $\mathbf{s}_d = [42 \ 419, \ 110 \ 390, \ 137 \ 459, \ 68 \ 488]$  px. Estas características deseadas son constantes durante toda la tarea ya que como se ha comentado el objeto permanece quieto durante la tarea de control. La tarea es una tarea de posicionamiento y, al igual que ocurre con los sistemas de control visual indirecto basado en imagen, al mantener fija la referencia deseada, el sistema de control visual sólo permite realizar tareas de posicionamiento punto a punto, sin ningún control de la trayectoria de la cámara entre las dos posiciones.

La constante  $K_p$  elegida para esta prueba ha sido la siguiente:

$$K_p = 0.4 \cdot \mathbf{I}_{8 \times 8} \text{ Nm/px}^2. \quad (5.6)$$

La matriz  $K_v$ :

$$K_v = \begin{pmatrix} 2.9 & 0 \\ 0 & 1.2 \end{pmatrix} \text{ Nms/rad}. \quad (5.7)$$

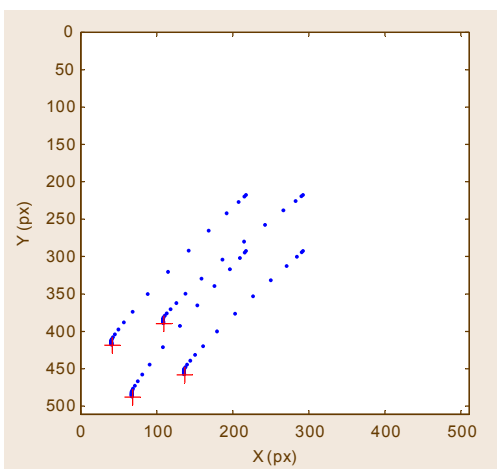


Fig. 5-6 Trayectoria obtenida en imagen durante la tarea de control visual directo

La Fig. 5-6 muestra la trayectoria en imagen que siguen las características visuales desde que comienza la tarea de control hasta que finaliza en la posición deseada.

La elección de las matrices permite corregir las situaciones de oscilación debido a ganancias excesivas en el controlador. La elección de unos valores muy bajos para estas constantes produce un movimiento excesivamente lento de la cámara hasta llegar a la posición final deseada.

El controlador permite disminuir el error en la imagen de manera exponencial, tal como se observa en la Fig. 5-7. El posicionamiento se ejecuta en pocas iteraciones. En esta prueba se muestra 1 iteración cada 3 segundos. El posicionamiento se realiza en aproximadamente 45 segundos. Es importante remarcar que no es objetivo de estas simulaciones optimizar los tiempos, sino probar los esquemas de control visual directo propuestos en el Apartado 5.3. En la Fig. 5-8 se pueden ver los pares enviados a las dos articulaciones del robot durante el posicionamiento con control visual directo.

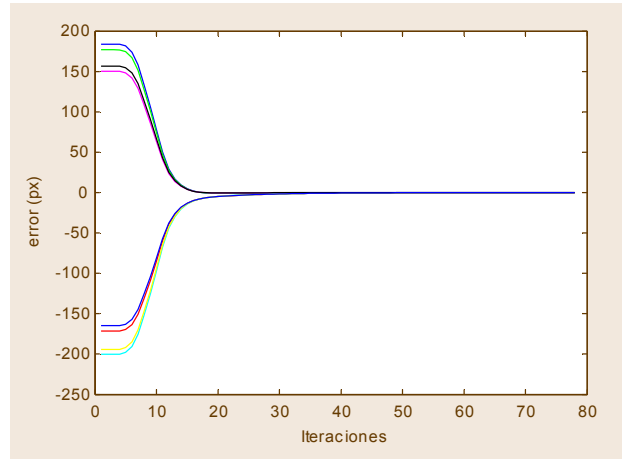


Fig. 5-7 Evolución del error de las características en la imagen para la tarea de control visual directo

El controlador se comporta correctamente para el posicionamiento punto a punto a partir de información en la imagen, enviando a cada articulación los pares que guían al robot hacia la posición deseada. La ventaja respecto a un controlador indirecto es clara, ya que este último sólo proporciona las velocidades en el extremo del robot, dejando al controlador interno del robot la tarea de traducir esas velocidades en el extremo a los pares necesarios para conseguir el movimiento deseado. Este controlador adicional introduce retardos innecesarios en la tarea de control, con lo que empeora la precisión y velocidad de la tarea.

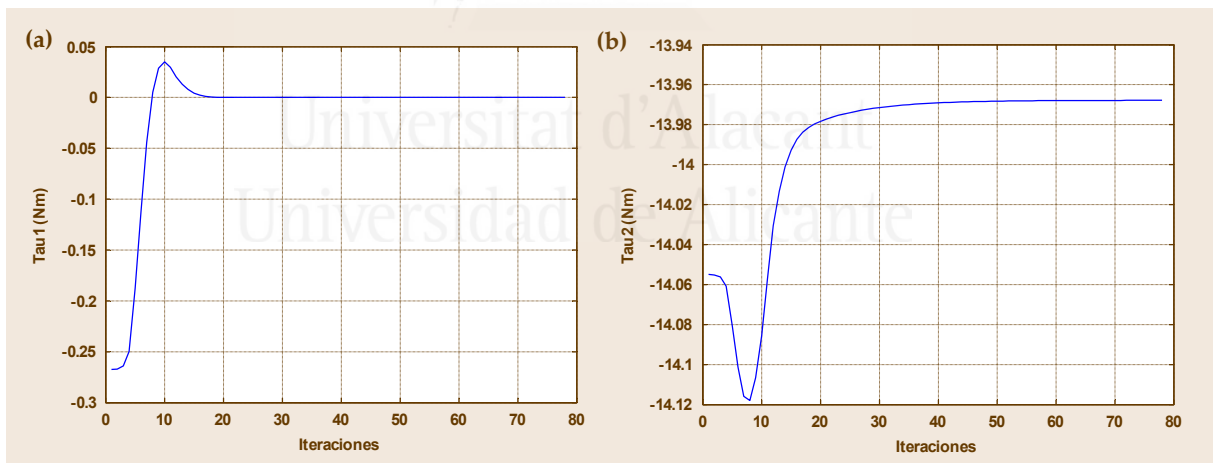


Fig. 5-8 Par enviado por el controlador durante el posicionamiento para: (a) la primera articulación (b) la segunda articulación

#### 5.4.4 Simulaciones de seguimiento de trayectorias

Para realizar el seguimiento de trayectorias con los métodos propuestos en el Apartado 5.3 se utiliza el mismo objeto que se ha utilizado en la tarea anterior de posicionamiento. Estos 4 puntos forman un cuadrado de 0.06 m de lado, cuyo centro está situado en el punto (0.35, 0, -0.8) m. El objeto, de nuevo, permanece quieto durante las tareas de seguimiento de las trayectorias deseadas. Se describirán a continuación las pruebas realizadas con cada método. Para poder comparar los resultados entre las tres aproximaciones, se han probado los controladores con las mismas trayectorias.



5.4.4.1 Método de umbral de error

5.4.4.1.1 Prueba 1

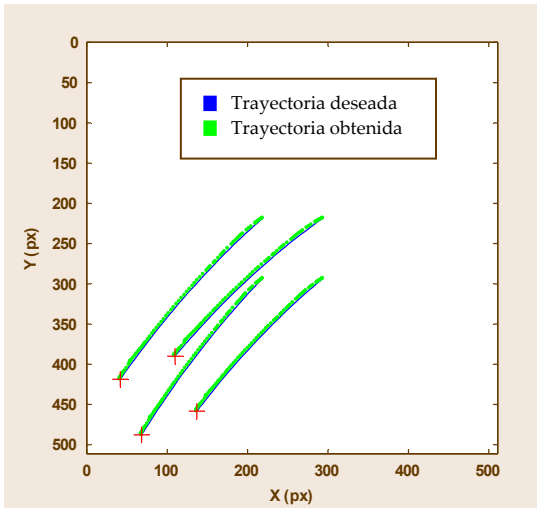


Fig. 5-9 Método de umbral de error. Prueba 1. Trayectoria deseada y trayectoria obtenida en el plano imagen durante el seguimiento

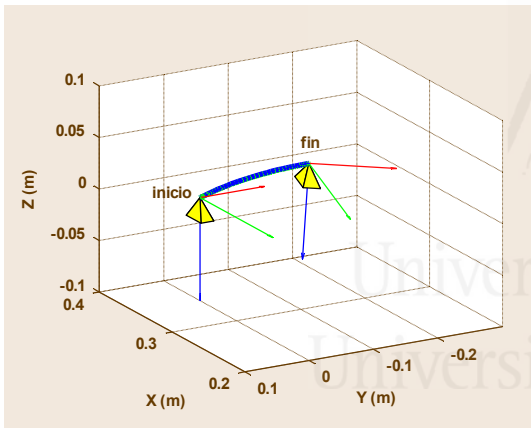


Fig. 5-10 Método de umbral de error. Prueba 1. Trayectoria deseada y trayectoria obtenida durante el seguimiento. Espacio 3-D

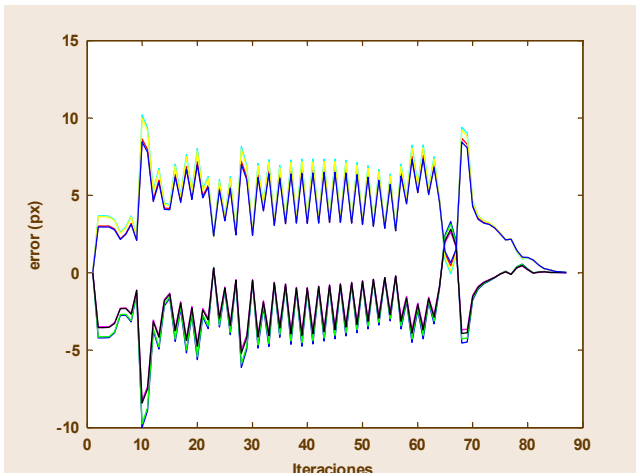


Fig. 5-11 Método de umbral de error. Prueba 1. Error en imagen durante el seguimiento

La primera simulación realizada para el método de umbral de error parte del robot en su posición inicial, esto es, sus dos articulaciones giradas 0 rad. Esta posición inicial sitúa los puntos en la imagen según  $s = [219 \ 219, \ 294 \ 219, \ 294 \ 294, \ 219 \ 294]$  px. Desde esta posición se pretende girar la primera articulación -0.4 rad y la segunda 0.15 rad. A partir de esta posición, la posición final de los puntos en la imagen se corresponde con  $s_d = [42 \ 419, \ 110 \ 390, \ 137 \ 459, \ 68 \ 488]$  px. Entre la posición inicial y final el robot debe seguir una trayectoria en imagen predefinida (ver Fig. 5-9).

La constante  $K_p$  elegida para esta prueba ha sido la siguiente:

$$K_p = 30 \cdot I_{8 \times 8} \text{ Nm/px}^2. \tag{5.8}$$

La matriz  $K_v$ :

$$K_v = 0.8 \cdot I_{2 \times 2} \text{ Nms/rad}. \tag{5.9}$$

La Fig. 5-10 muestra la trayectoria seguida por el robot, así como la trayectoria deseada. El seguimiento se completa satisfactoriamente visitando todas las referencias por debajo del umbral de error establecido en 2 píxeles. La Fig. 5-11 muestra cómo va evolucionando este error en imagen según se van visitando las distintas referencias.

La elección de las constantes  $K_p$  y  $K_v$  evitan un comportamiento oscilatorio del extremo a costa de reducir la velocidad en la tarea de control. Cuando se da una referencia por visitada se pasa a la siguiente, incrementándose el error y bajando nuevamente éste de manera exponencial por debajo de los 2 píxeles definidos como umbral.

La Fig. 5-9 muestra, además de la trayectoria deseada, el resultado del seguimiento de la trayectoria en el espacio imagen. Se observa que el seguimiento se

ha realizado correctamente, ya que la trayectoria descrita se superpone de manera perfecta a la trayectoria deseada.

Por último, en la Fig. 5-12.(a) se representa la evolución de los pares enviados a la primera articulación, y en la Fig. 5-12.(b) los pares enviados a la segunda articulación durante la tarea de control. Destaca la oscilación que presentan los pares enviados a las dos articulaciones. Esto puede ajustarse con las constantes proporcional y derivativa del controlador, así como con el umbral de error permitido.

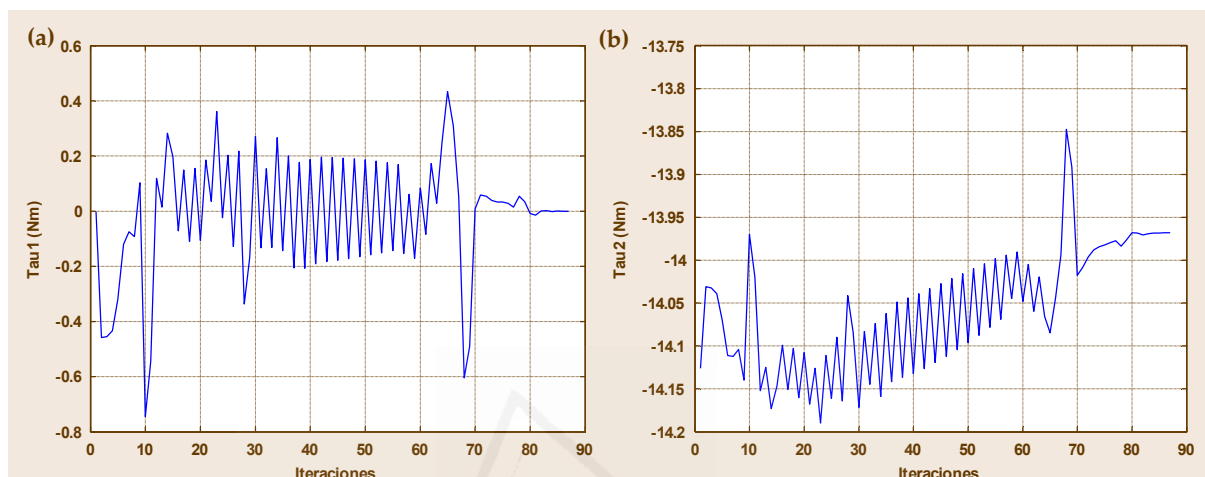


Fig. 5-12 Método de umbral de error. Prueba 1. Par enviado por el controlador durante el seguimiento para: (a) la primera articulación (b) la segunda articulación

Los pares enviados a la segunda articulación son de un orden superior a los enviados a la primera articulación. Esto es debido a que en la primera articulación no interviene el componente gravitacional, mientras que en la segunda articulación sí.

#### 5.4.4.1.2 Prueba 2

En esta segunda simulación se mantiene la trayectoria deseada utilizada en la primera prueba y lo único que se modifica son las constantes  $K_p$  y  $K_v$ . Con esto se quiere mostrar cómo afectan las constantes en la velocidad y precisión del seguimiento.

La constante  $K_p$  elegida para esta segunda prueba ha sido la siguiente:

$$K_p = 0.8 \cdot \mathbf{I}_{8 \times 8} \text{ Nm/px}^2. \quad (5.10)$$

Y la matriz  $K_v$ :

$$K_v = \begin{pmatrix} 1.6 & 0 \\ 0 & 1.9 \end{pmatrix} \text{ Nms/rad}. \quad (5.11)$$

En comparación con las constantes definidas para la primera simulación, se ha disminuido bastante la constante proporcional  $K_p$ , incrementando a su vez la derivativa  $K_v$ , pero esta vez dando distinto valor a la componente de la primera articulación y de la segunda. Con esto se pretende mejorar el comportamiento de la primera articulación, que en distintas pruebas de constantes parece retrasarse respecto a la segunda articulación.

La Fig. 5-13.(a) muestra de nuevo un correcto comportamiento en 3-D del seguimiento de trayectorias. La trayectoria deseada es la misma que para la primera simulación, la figura muestra otro ángulo de vista, recalcando de nuevo la precisión del método.

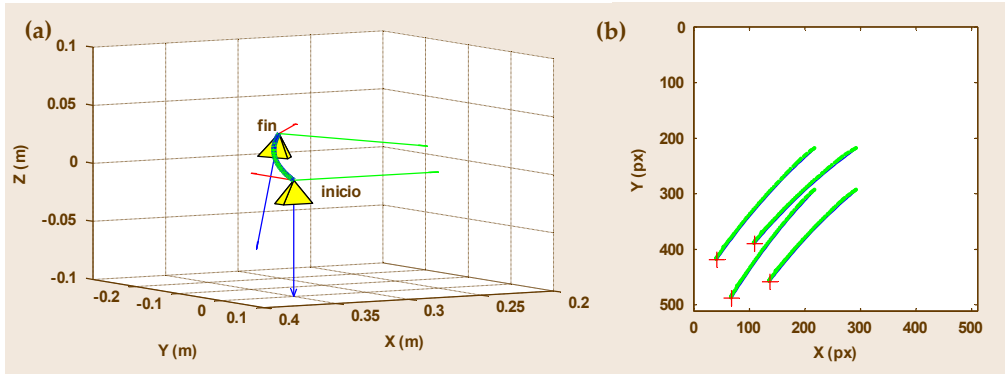


Fig. 5-13 Método de umbral de error. Prueba 2. Trayectoria deseada y trayectoria obtenida durante el seguimiento. (a) Plano imagen (b) Espacio 3-D

Esta precisión se puede ver mucho mejor en la Fig. 5-14. Esta figura muestra el error en imagen durante la tarea de seguimiento de la trayectoria deseada. Al modificar las constantes del controlador se ha conseguido una mayor precisión, a costa de emplear mayor número de iteraciones para completar la trayectoria. El resultado en imagen es el mismo que el obtenido en la primera prueba, es decir, un seguimiento perfecto dentro del umbral de error definido de 2 píxeles (ver Fig. 5-13.(b)).

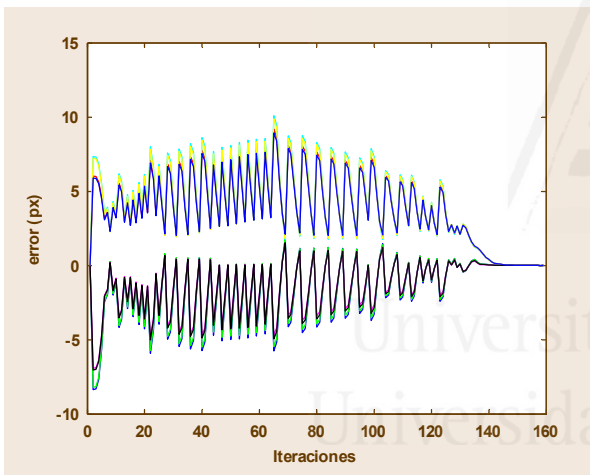


Fig. 5-14 Método de umbral de error. Prueba 2. Error en imagen durante el seguimiento

La mejora en la nueva elección de las constantes se hace más patente en la evolución de los pares enviados durante el control.

En la Fig. 5-15.(a) se muestran los pares enviados a la primera articulación, mientras que en la Fig. 5-15.(b) se muestra la evolución de los pares enviados a la segunda articulación.

Al reducir la constante proporcional se tiene un seguimiento más lento, aspecto que se puede ver perfectamente en la disminución de los valores medios de los pares enviados a la primera articulación. El comportamiento es mucho menos oscilatorio que en la primera prueba como muestra la gráfica de los pares que el controlador ha enviado a la segunda articulación. En cualquier caso, las dos pruebas han resultado satisfactorias, ya que el seguimiento en las dos se consigue de forma precisa atendiendo al umbral de error definido.

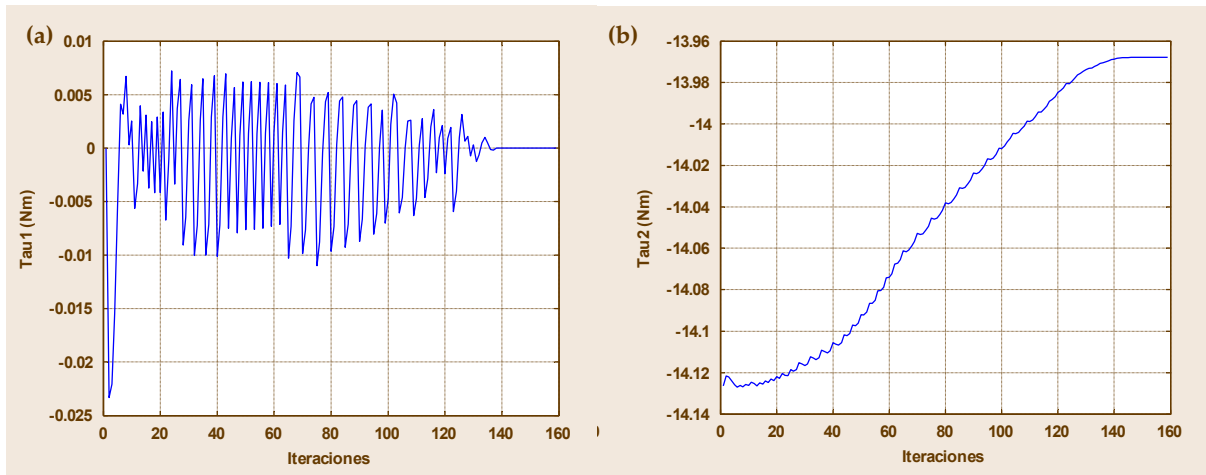


Fig. 5-15 Método de umbral de error. Prueba 2. Par enviado por el controlador durante el seguimiento para: (a) la primera articulación (b) la segunda articulación

En la Fig. 5-16.(a) se pueden ver las velocidades enviadas al robot. En ella se puede apreciar el comportamiento oscilatorio del método de umbral de error. La velocidad va descendiendo hasta que se alcanza el umbral de error correspondiente a la referencia deseada. En este momento el método de seguimiento modifica la referencia deseada y de nuevo se incrementa la velocidad. Este proceso, sin embargo, evita situaciones en las que el robot llega a tener velocidad cero. Esto ocurriría si se define nulo el umbral de error, lo que supondría no pasar a la siguiente referencia de la trayectoria hasta que se haya visitado la anterior de manera precisa. La Fig. 5-16.(b) muestra el módulo de la velocidad lineal obtenido durante el seguimiento. De nuevo se aprecia el comportamiento oscilante del método, al tiempo que se observa que la velocidad no llega a ser cero durante la tarea de seguimiento, gracias al establecimiento del umbral de error de 2 px.

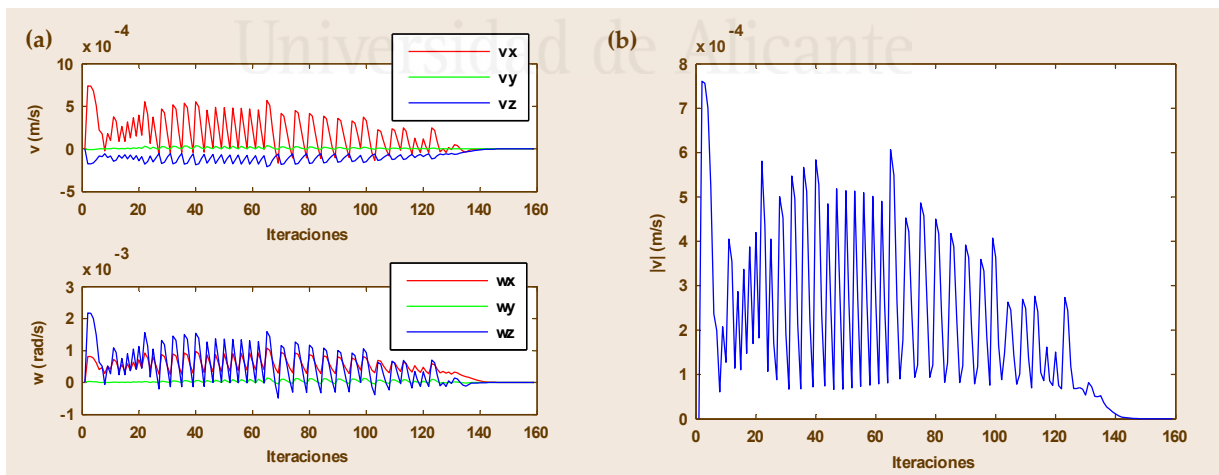


Fig. 5-16 Método de umbral de error. Prueba 2. (a) Velocidad lineal y angular del extremo del robot durante el seguimiento (b) Evolución del módulo de la velocidad durante la tarea de seguimiento

#### 5.4.4.1.3 Prueba 3

Finalmente, se presenta una prueba con una trayectoria más compleja que la descrita en las dos simulaciones anteriores. Se parte también del robot en su posición inicial, esto es, sus dos articulaciones giradas 0 rad. Esta posición inicial sitúa los puntos

en la imagen según  $s = [219 \ 219, 294 \ 219, 294 \ 294, 219 \ 294]$  px. Desde esta posición se gira la primera articulación  $-0.2$  rad y la segunda  $0.1$  rad. Posteriormente, se vuelve a girar la primera articulación  $0.6$  rad sobre la posición anterior y la segunda articulación  $0.05$  rad, también respecto a esta posición intermedia. La posición final de los puntos en la imagen se corresponde con  $s_a = [402 \ 390, 470 \ 419, 444 \ 488, 375 \ 459]$  px. Entre la posición inicial y final el robot debe seguir una trayectoria en imagen predefinida (ver Fig. 5-17.(a)).

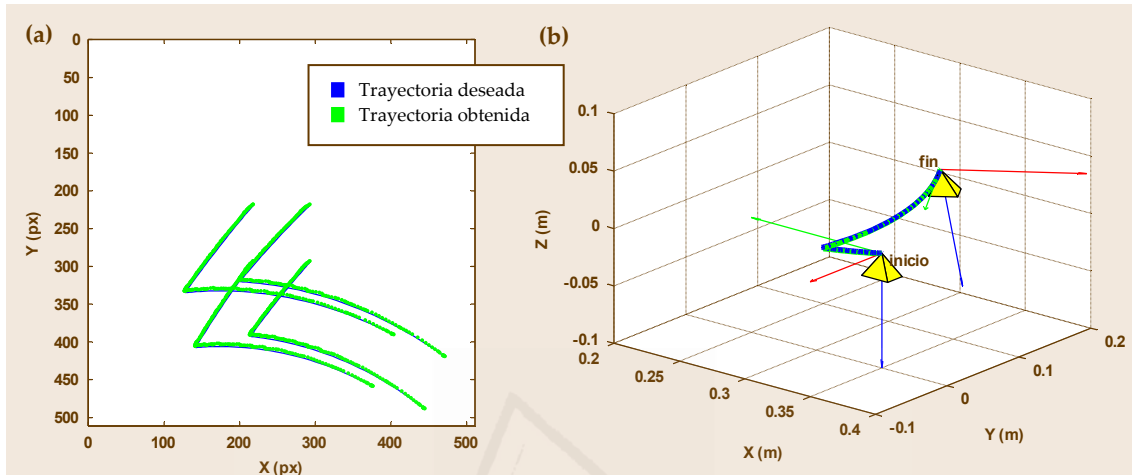


Fig. 5-17 Método de umbral de error. Prueba 3. Trayectoria deseada y trayectoria obtenida durante el seguimiento. (a) Plano imagen (b) Espacio 3-D

Las constantes elegidas para esta prueba son las mismas que se han usado en la Simulación 2, esto es (5.10) y (5.11). Con estos datos iniciales se ejecuta el método de umbral de error, obteniendo un perfecto seguimiento de la trayectoria deseada, tal como muestra la Fig. 5-17.(b). También en imagen como muestra la Fig. 5-17.(a).

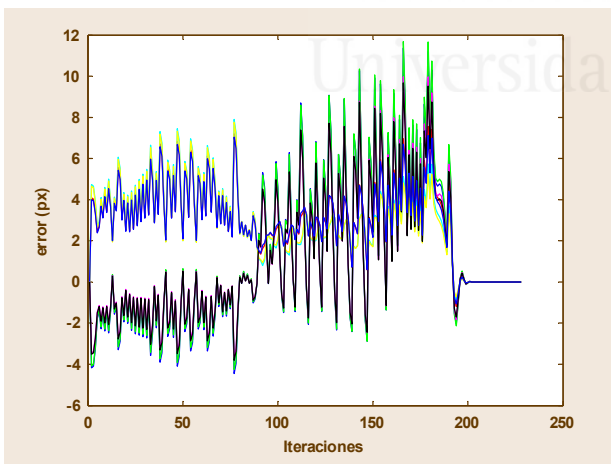


Fig. 5-18 Método de umbral de error. Prueba 3. Error en imagen durante el seguimiento

De nuevo se observa un buen comportamiento en la evolución del error en la imagen, tal como muestra la Fig. 5-18. En la segunda parte de la trayectoria las referencias de la trayectoria deseada están más separadas, dado que se ejecuta a mayor velocidad, de ahí que se incrementen los picos de error. Este efecto de desplazamiento mayor también queda reflejado en los pares enviados a la primera articulación (ver Fig. 5-19.(a)). La Fig. 5-19.(b) muestra los pares enviados a la segunda articulación durante el control del seguimiento de esta tercera simulación.

Las velocidades del extremo del robot durante el seguimiento de la trayectoria se muestran en la Fig. 5-20.(a). La Fig. 5-20.(b) representa la evolución del módulo de la velocidad. Las gráficas muestran el mismo comportamiento oscilatorio que se describió en la prueba anterior.

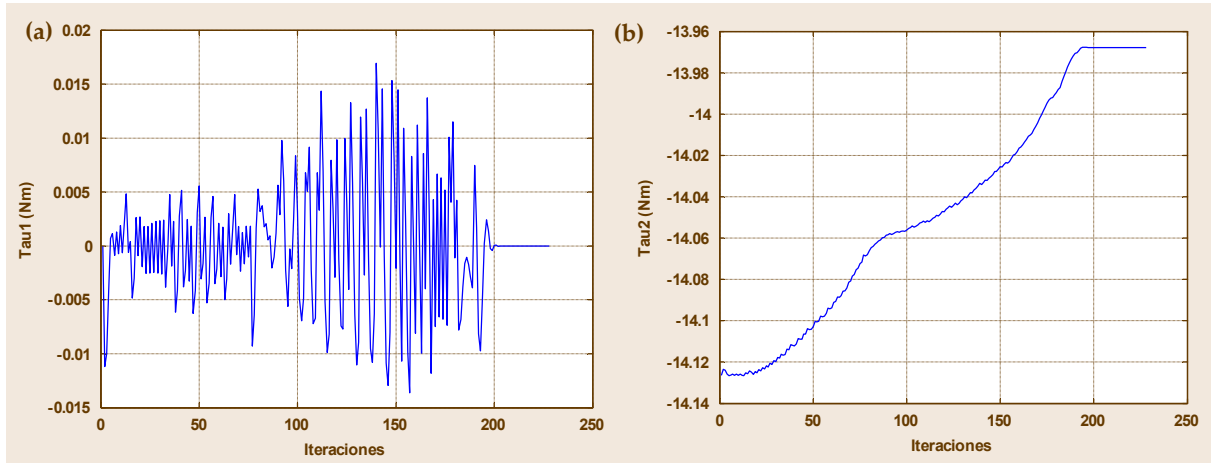


Fig. 5-19 Método de umbral de error. Prueba 3. Par enviado por el controlador durante el seguimiento para: (a) la primera articulación (b) la segunda articulación

Las pruebas realizadas usando el método de umbral de error permiten concluir que el seguimiento se realiza de forma correcta tanto en el espacio imagen como en el espacio 3-D. Sin embargo, la técnica utilizada para evitar que el robot pare en cada referencia de la trayectoria deseada introduce demasiada oscilación en los pares enviados al robot, y por lo tanto, en la velocidad de seguimiento. Además, este método no permite indicar una velocidad de seguimiento mínima, con lo que dependiendo de las ganancias del sistema se tendrá una velocidad mayor o menor, pero nunca controlada.

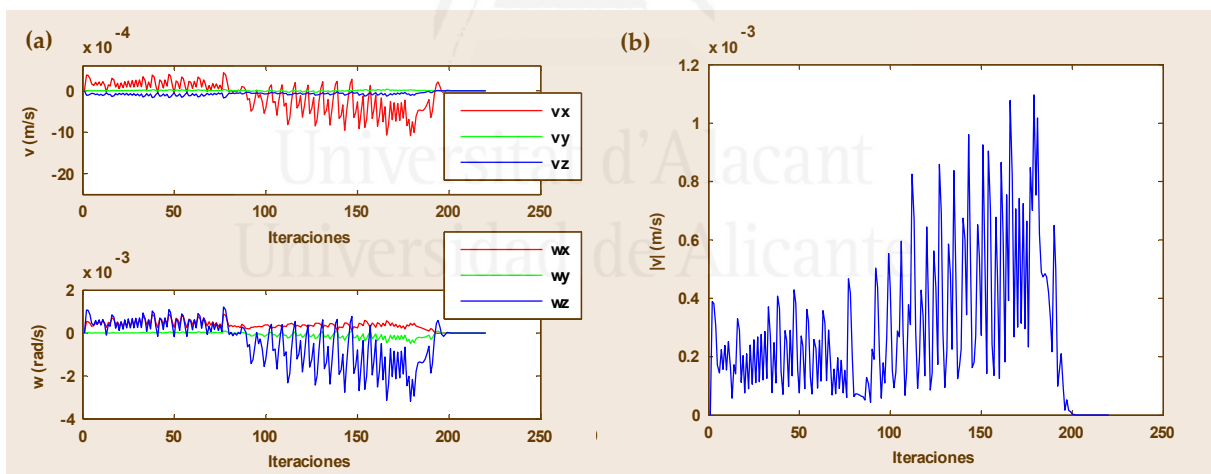


Fig. 5-20 Método de umbral de error. Prueba 3. (a) Velocidad lineal y angular del extremo del robot durante el seguimiento (b) Evolución del módulo de la velocidad durante la tarea de seguimiento

#### 5.4.4.2 Método de velocidad mínima

##### 5.4.4.2.1 Prueba 1

La primera prueba a la que se somete el método de velocidad mínima descrito en la Sección 5.3 es el seguimiento de la misma trayectoria que se ha utilizado en los Apartados 5.4.3.1.1 y 5.4.3.1.2. La trayectoria parte del robot en su posición inicial, esto es, sus dos articulaciones giradas 0 rad. Esta posición inicial sitúa los puntos en la imagen según  $s = [219 \ 219, 294 \ 219, 294 \ 294, 219 \ 294]$  px. Desde esta posición se pretende girar la primera articulación  $-0.4$  rad y la segunda  $0.15$  rad. A partir de esta posición, la posi-



ción final de los puntos en la imagen se corresponde con  $s_d = [42 \ 419, 110 \ 390, 137 \ 459, 68 \ 488]$  px. Para llegar a esta posición final se sigue la trayectoria azul que se mostraba en la Fig. 5-9. La constante  $K_p$  elegida para esta segunda prueba ha sido la siguiente:

$$K_p = 0.8 \cdot \mathbf{I}_{8 \times 8} \text{ Nm/px}^2. \quad (5.12)$$

Y la matriz  $K_v$ :

$$K_v = \begin{pmatrix} 1.6 & 0 \\ 0 & 1.9 \end{pmatrix} \text{ Nms/rad}. \quad (5.13)$$

Se han elegido las mismas constantes que la prueba realizada en el Apartado 5.4.3.1.2 de forma que se puedan comparar las dos pruebas.

El método de velocidad mínima, sin embargo, permite también controlar en cierta forma la velocidad del seguimiento. Esto no era posible con el método de umbral de error. Para la presente prueba, se ha establecido que el módulo de la velocidad mínima deseada sea de 2.7 mm/s. Con esta velocidad, el seguimiento es bastante preciso, tanto en el espacio imagen (como muestra la Fig. 5-21.(a)), como en el espacio Cartersiano 3-D (ver Fig. 5-21.(b)).

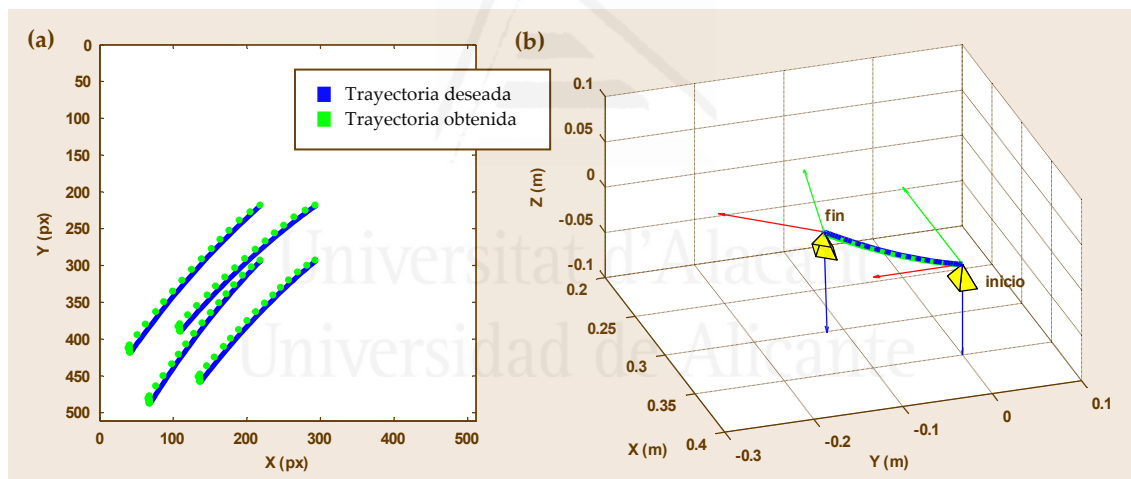


Fig. 5-21 Método de velocidad mínima. Prueba 1. Trayectoria deseada y trayectoria obtenida durante el seguimiento. (a) Plano imagen (b) Espacio 3-D

La velocidad elegida para el seguimiento, permite completar la tarea en muy pocas iteraciones en comparación con el método de umbral de error. La Fig. 5-22 muestra la evolución del error de las características en la imagen para el seguimiento de la trayectoria. En ella se puede observar que la siguiente referencia para cada iteración está dentro de un margen de error de unos 15 píxeles, que es una diferencia aceptable, dado que se quiere al mismo tiempo mantener una velocidad elevada para la distancia que hay entre las muestras de la trayectoria.

La Fig. 5-24 muestra los pares enviados al robot por el controlador durante la tarea de seguimiento. El resultado es una evolución mucho menos oscilatoria que la obtenida con el método de umbral de error (ver Fig. 5-15). La principal ventaja del método de velocidad mínima respecto al método de umbral de error es que con el primero se consigue asegurar una velocidad mínima de seguimiento. En la Fig. 5-24 se representan las velocidades lineal y angular del extremo del robot, así como el módulo de la velocidad lineal durante el seguimiento de la trayectoria propuesta en esta prueba. El módulo de la velocidad se mantiene siempre por encima del valor deseado de 2.7 mm/s.

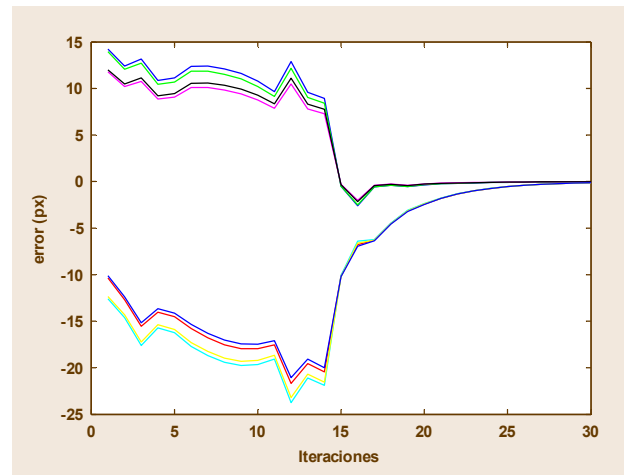


Fig. 5-22 Método de velocidad mínima. Prueba 1. Error en imagen durante el seguimiento

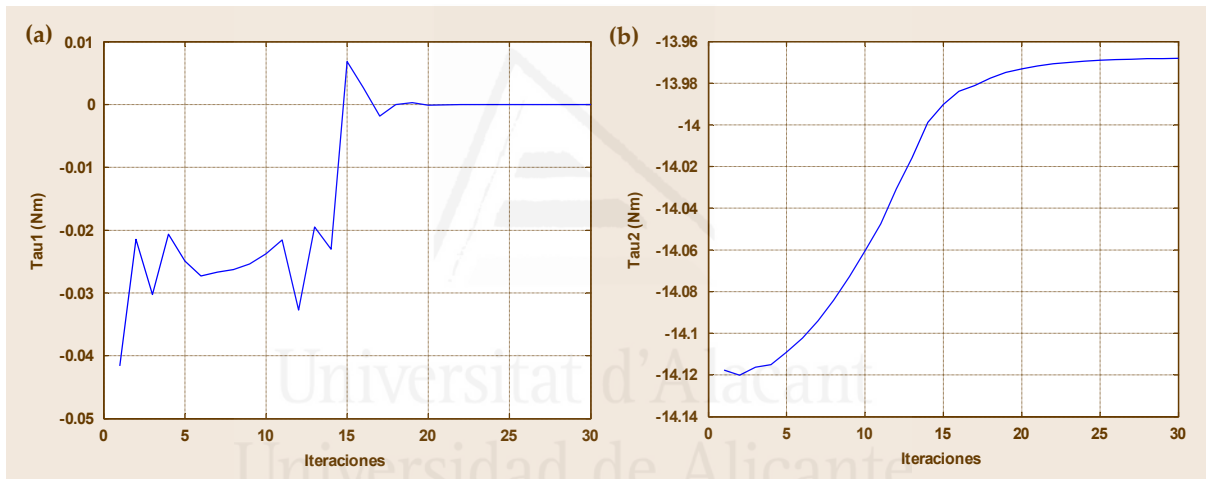


Fig. 4-23 Método de velocidad mínima. Prueba 1. Par enviado por el controlador durante el seguimiento para: (a) la primera articulación (b) la segunda articulación

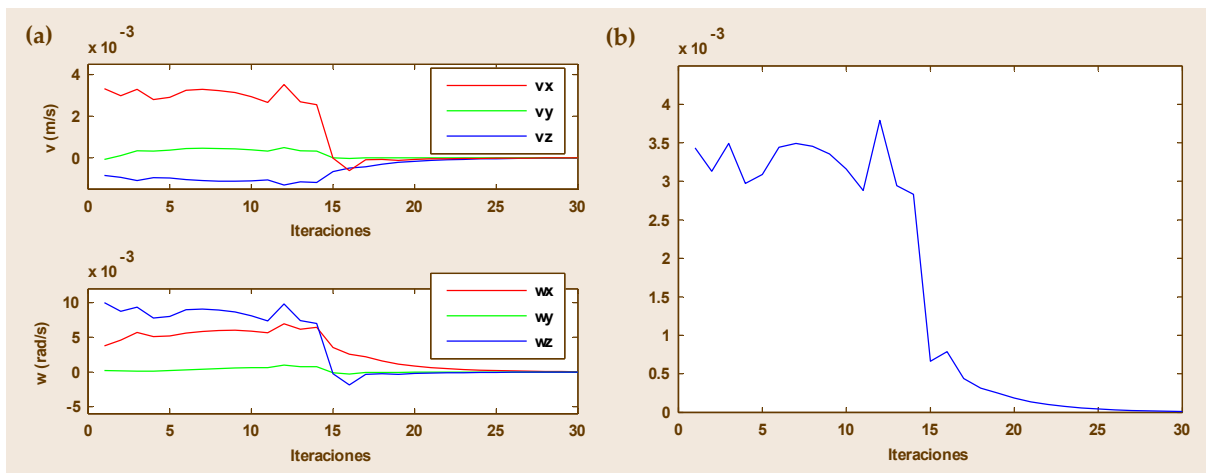


Fig. 5-24 Método de velocidad mínima. Prueba 1. (a) Velocidad lineal y angular del extremo del robot durante el seguimiento (b) Evolución del módulo de la velocidad durante la tarea de seguimiento

#### 5.4.4.2.2 Prueba 2

La segunda prueba realizada utilizando el método de velocidad mínima emplea la misma trayectoria que se ha utilizado en el Apartado 5.4.3.1.3 sobre el método de umbral de error. La trayectoria es una trayectoria más compleja que la definida en la prueba descrita en el Apartado 5.4.3.2.1. La trayectoria utilizada en esa segunda prueba presenta un cambio de dirección brusco. Se parte también del robot en su posición inicial, esto es, sus dos articulaciones giradas 0 rad. Esta posición inicial sitúa los puntos en la imagen según  $s = [219 \ 219, 294 \ 219, 294 \ 294, 219 \ 294]$  px. Desde esta posición se gira la primera articulación  $-0.2$  rad y la segunda  $0.1$  rad. Posteriormente, se establece la posición articular  $[0.4 \ 0.15]$  rad. La posición final de los puntos en la imagen se corresponde con  $s_d = [402 \ 390, 470 \ 419, 444 \ 488, 375 \ 459]$  px. Entre la posición inicial y final el robot debe seguir la trayectoria en imagen predefinida que se mostraba en la Fig. 5-17.(a).

Las constantes elegidas para esta prueba son las mismas que se han venido utilizando desde la Prueba 2 del Apartado 5.4.3.1.2, esto es (5.10) y (5.11). Estas constantes se seguirán utilizando en el resto de pruebas que se describen en el presente Capítulo. El módulo de la velocidad mínima deseada es  $2.7$  mm/s.

Tras realizar el seguimiento de la trayectoria deseada con el método de velocidad mínima se obtiene la evolución de las características en la imagen indicadas en la Fig. 5-25.(a). Como se puede apreciar, el seguimiento es de nuevo aceptable, teniendo en cuenta que se debe garantizar una velocidad mínima. Lo mismo que en el plano imagen se puede decir de la trayectoria de la cámara en el espacio Cartesiano 3-D. La trayectoria del seguimiento pasa por encima de la trayectoria deseada (ver Fig. 5-25.(b)).

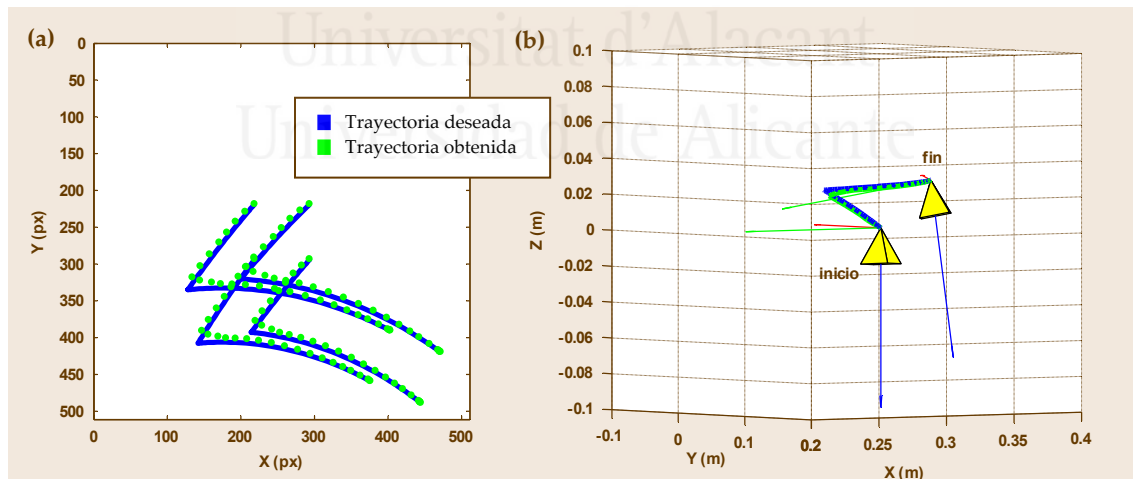


Fig. 5-25 Método de velocidad mínima. Prueba 2. Trayectoria deseada y trayectoria obtenida durante el seguimiento. (a) Plano imagen (b) Espacio 3-D

Para mantener la velocidad mínima de seguimiento el error en imagen es ligeramente mayor en la primera parte de la trayectoria (ver Fig. 5-26). Esto es debido a que las referencias están más juntas. De esta forma, el controlador salta más referencias que si estas referencias estuvieran más separadas en imagen. En cualquier caso, la evolución del error en la imagen mostrada en la Fig. 5-26 permite ratificar que el método de velocidad mínima tiene un comportamiento mucho menos oscilatorio que el obtenido con el método de umbral de error (ver Fig. 5-18).

Esta mejora en el comportamiento oscilatorio se observa mejor al comparar los pares enviados a la primera articulación (ver Fig. 5-27) con los pares que se obtenían para la misma articulación usando las mismas constantes par el controlador y la misma trayectoria deseada en el método de umbral de error (ver Fig. 5-19.(a)). Se ha conseguido mejorar este aspecto mucho, obteniendo un mejor control de la articulación, que mantiene así un par más o menos constante hasta llegar a la posición deseada.

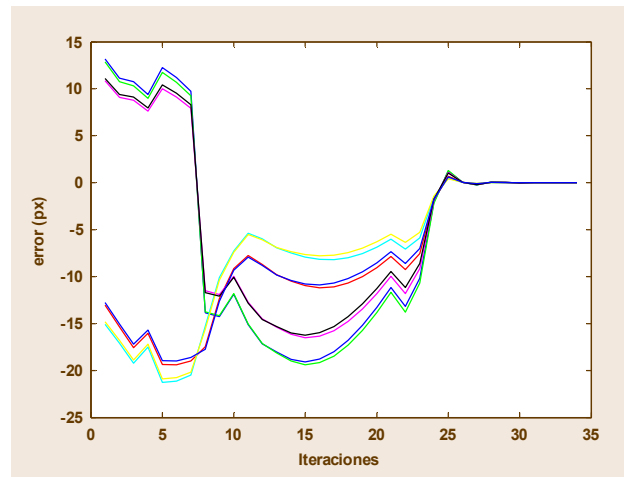


Fig. 5-26 Método de velocidad mínima. Prueba 2. Error en imagen durante el seguimiento

Por último, si se observa las velocidades enviadas por el controlador al robot durante el seguimiento de esta trayectoria (ver Fig. 5-28), se comprueba de nuevo la mejora en cuanto a la reducción de oscilaciones durante el seguimiento. Además, la velocidad se mantiene de nuevo por encima de 2.7 mm/s, tal y como se define en los parámetros iniciales de la prueba. El método de velocidad mínima ha funcionado correctamente,

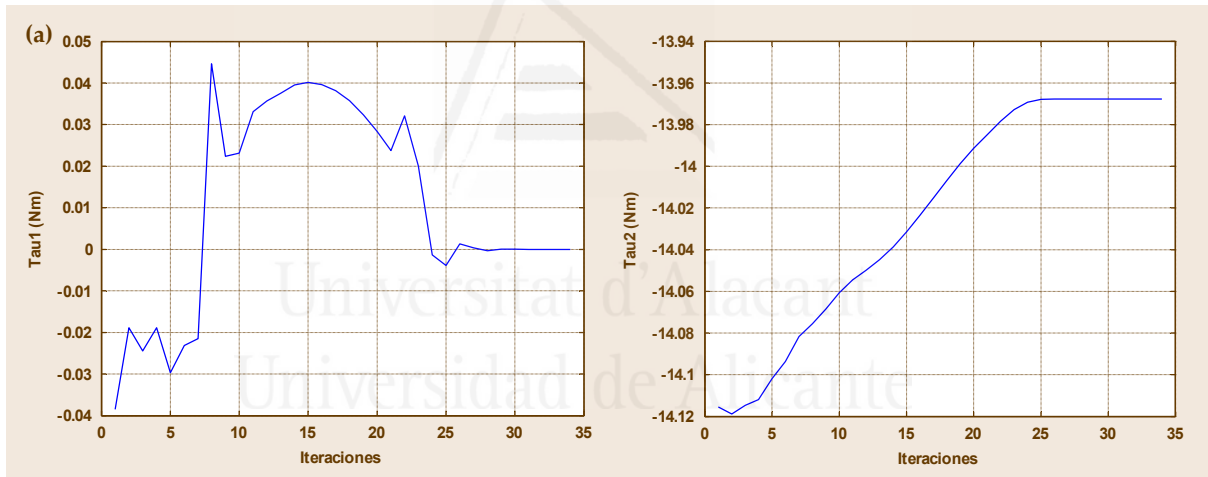


Fig. 5-27 Método de velocidad mínima. Prueba 2. Par enviado por el controlador durante el seguimiento para: (a) la primera articulación (b) la segunda articulación

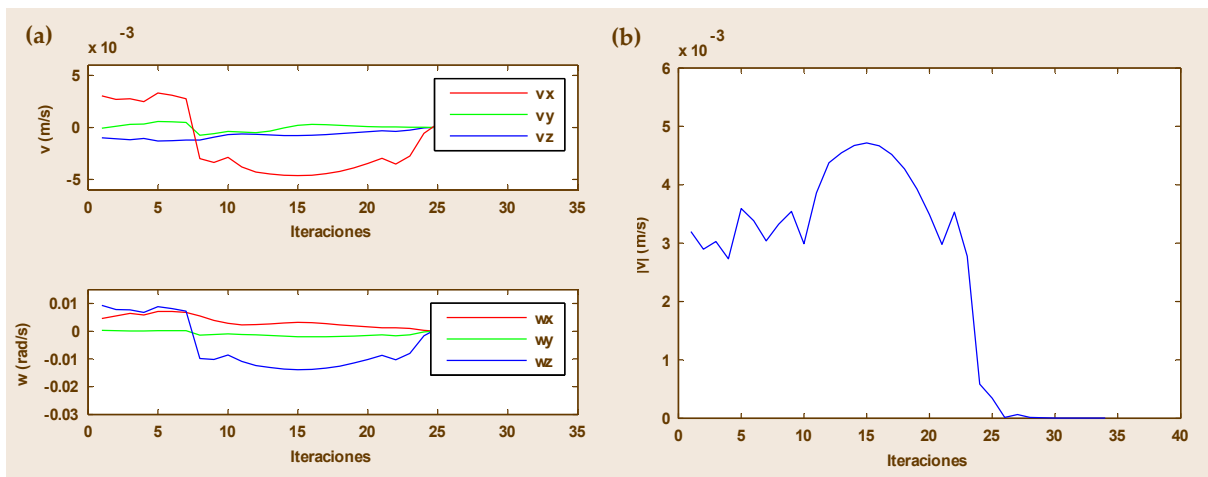


Fig. 5-28 Método de velocidad mínima. Prueba 2. (a) Velocidad lineal y angular del extremo del robot durante el seguimiento (b) Evolución del módulo de la velocidad durante la tarea de seguimiento

obteniendo unos resultados adecuados en los espacios imagen y 3-D, a la vez que mantiene una velocidad mínima deseada durante la tarea de seguimiento. Los pares enviados al robot presentan un carácter menos oscilatorio que los que envía el método de umbral de error para la misma trayectoria y con las mismas constantes del controlador. Sin embargo, la velocidad no es constante durante el seguimiento, y sólo se puede controlar que superará un umbral definido, sin asegurar en ningún momento qué máximos alcanzará durante el seguimiento de la trayectoria deseada.

#### 5.4.4.3 Método de velocidad constante

Las dos pruebas realizadas sobre el método de mínima velocidad han demostrado que este método mejora considerablemente las prestaciones del método de umbral de error. A continuación se presentan los resultados obtenidos al ejecutar las mismas pruebas sobre el método de velocidad constante.

##### 5.4.4.3.1 Prueba 1

Con la intención de comparar el método de velocidad constante con los otros dos métodos descritos hasta el momento para el seguimiento de trayectorias en la imagen, se han elegido las mismas constantes del controlador (ver (5.10) y (5.11)). Además, la trayectoria deseada para la prueba de seguimiento es la misma que la descrita en los Apartados 5.4.3.1.2 y 5.4.3.2.1 (ver Fig. 5-9). El módulo de la velocidad deseada se ha establecido en 2.7 mm/s al igual que la velocidad mínima deseada en la primera prueba del método de velocidad mínima descrita en el Apartado 5.4.3.2.1.

La Fig. 5-29.(a) muestra la trayectoria en imagen de las características visuales. El resultado es más preciso que el obtenido con el método de velocidad mínima. De nuevo, la trayectoria en el espacio 3-D seguida por la cámara durante la tarea de seguimiento copia perfectamente la trayectoria deseada, tal como ocurría con los otros dos métodos propuestos (ver Fig. 5-29.(b)).

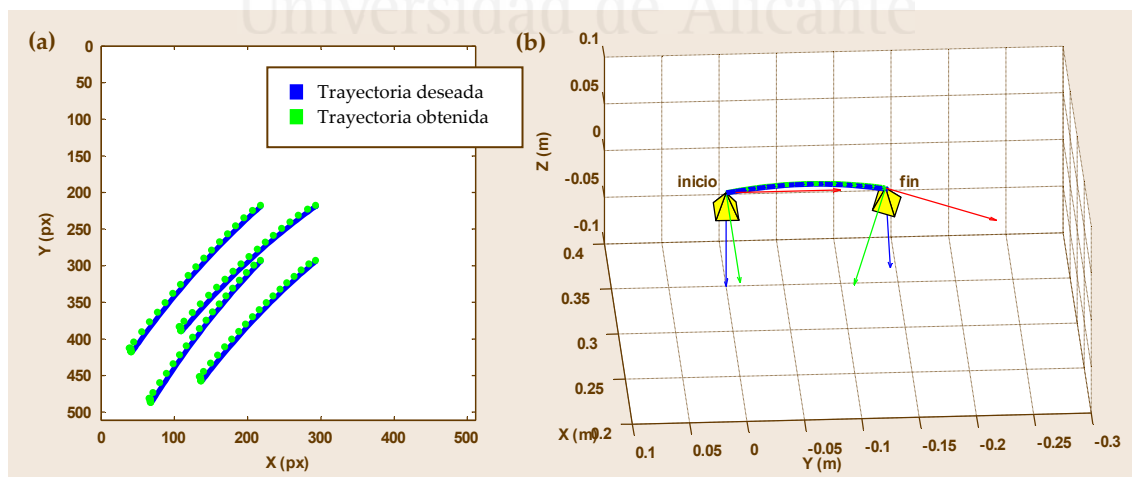


Fig. 5-29 Método de velocidad constante. Prueba 1. Trayectoria deseada y trayectoria obtenida durante el seguimiento. (a) Plano imagen (b) Espacio 3-D

La mayor precisión con la que el método de velocidad constante realiza el seguimiento en comparación con el método de velocidad mínima se aprecia mejor en la Fig. 5-30, donde se muestra la evolución del error de las características en la imagen. La siguiente referencia en el método de velocidad constante se obtiene interpolando entre

la posición que supera el módulo de la velocidad deseada y la posición anterior en la trayectoria. Es decir, la siguiente referencia para el controlador dinámico está más próxima a la posición actual que la referencia que proporciona el método de velocidad mínima en las mismas condiciones. Por eso el error en imagen es menor en el caso del método de velocidad constante.

Una de las principales mejoras que proporciona el método de velocidad mínima con respecto al método de umbral de error es que los pares enviados por el controlador son menos oscilatorios. El método de velocidad constante mejora todavía más este aspecto como se puede comprobar en la Fig. 5-31 que representa la evolución de los pares enviados a las dos articulaciones durante el control del seguimiento de la trayectoria predefinida. Este aspecto es importante, ya que los motores no sufren lo mismo si se le varían continuamente los voltajes o se le mantienen constantes para tareas donde la articulación se desplazan en una misma dirección. De los tres métodos, el método de velocidad constante es el que mejores resultados arroja en este sentido.

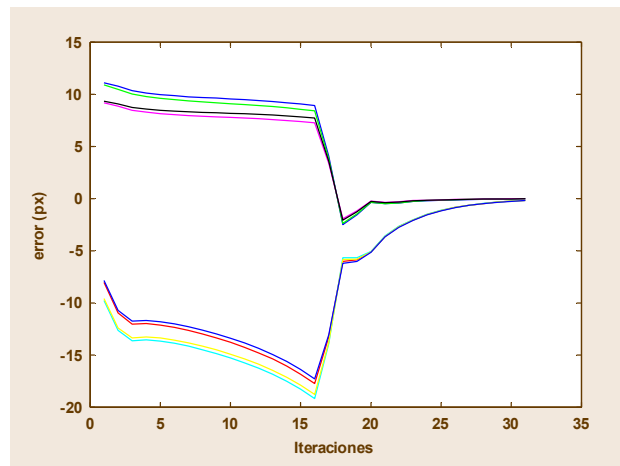


Fig. 5-30 Método de velocidad constante. Prueba 1. Error en imagen durante el seguimiento

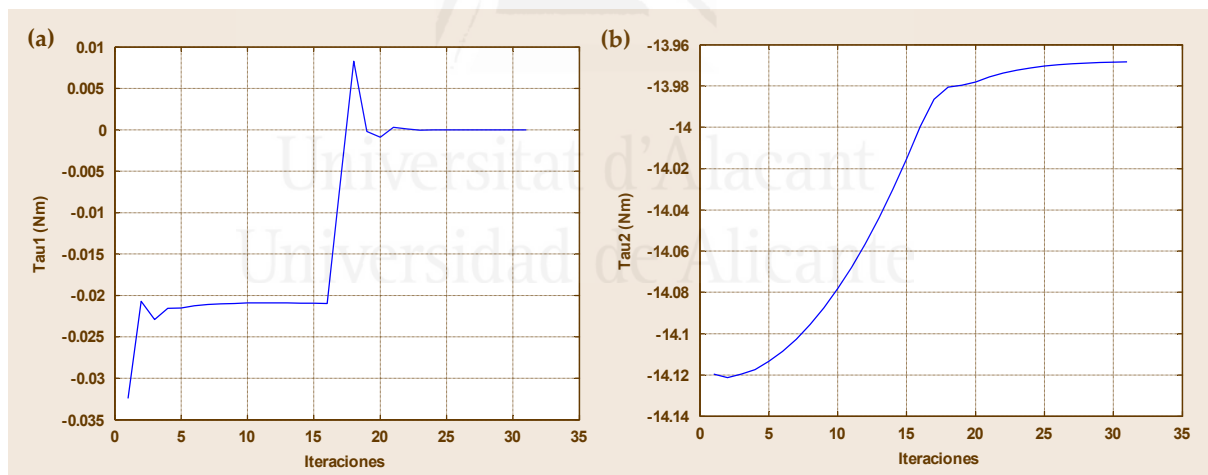


Fig. 5-31 Método de velocidad constante. Prueba 1. Par enviado por el controlador durante el seguimiento para: (a) la primera articulación (b) la segunda articulación

Pero es en el control sobre la velocidad de seguimiento donde realmente el método de velocidad constante mejora las prestaciones de los métodos anteriores, y más concretamente las del método de velocidad mínima, ya que el método de umbral mínimo no permite realmente controlar la velocidad de ningún modo. La Fig. 5-32.(a) representa las velocidades lineal y angular del extremo del robot durante el seguimiento. En la Fig. 5-32.(b) se puede ver la evolución del módulo de la velocidad. Las dos gráficas muestran cómo la velocidad se ha controlado durante el seguimiento, manteniéndola constante. El módulo de la velocidad deseada se estableció en 2.7 mm/s para poder comparar el resultado con los obtenidos en la prueba del método de velocidad mínima sobre la misma trayectoria y bajo las mismas condiciones (ver Fig. 5-24).



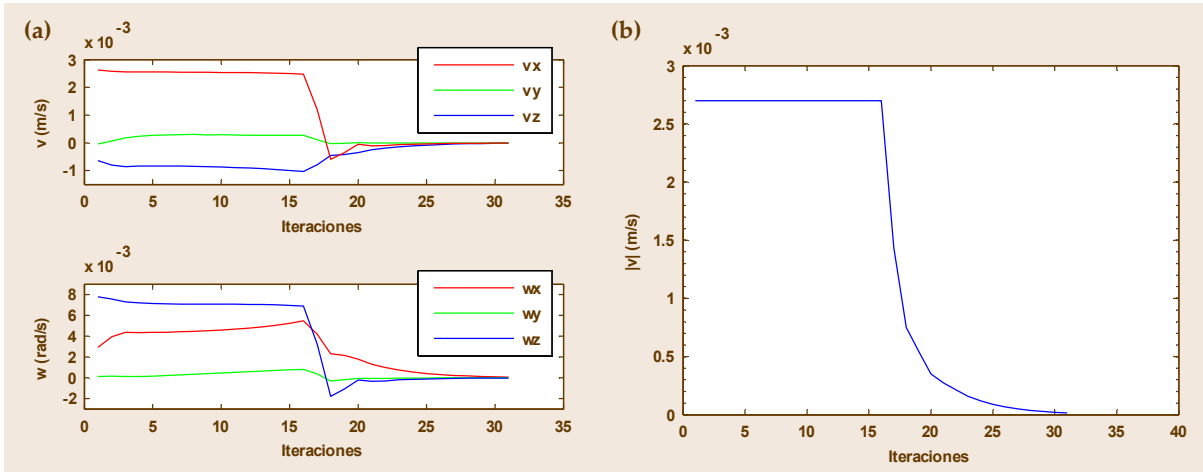


Fig. 5-32 Método de velocidad constante. Prueba 1. (a) Velocidad lineal y angular del extremo del robot durante el seguimiento (b) Evolución del módulo de la velocidad durante la tarea de seguimiento

#### 5.4.4.3.2 Prueba 2

La segunda prueba del método de velocidad constante se realiza sobre la trayectoria ya probada en el método de umbral de error en el Apartado 5.4.3.1.3 (ver Fig. 5-17.(a)) y en el método de velocidad mínima en el Apartado 5.4.3.2.2. De nuevo, las constantes elegidas para esta prueba son las mismas que se han venido utilizando desde la Prueba 2 del Apartado 5.4.3.1.2, esto es (5.10) y (5.11), y que permiten comparar los resultados en las mismas condiciones del controlador. También, como en las pruebas anteriores en las que se podía establecer una velocidad de seguimiento (ya sea una velocidad mínima como en el método de velocidad mínima o una velocidad constante, como en la prueba realizada con el método de velocidad constante del Apartado anterior), se establece un módulo de la velocidad deseada de 2.7 mm/s.

Con estas condiciones iniciales, se obtiene la trayectoria en imagen mostrada en la Fig. 5-33.(a). Tanto esta trayectoria como la seguida por la cámara en el espacio Cartesiano 3-D (ver Fig. 5-33.(b)) se ajustan con precisión a las trayectorias deseadas en ambos espacios.

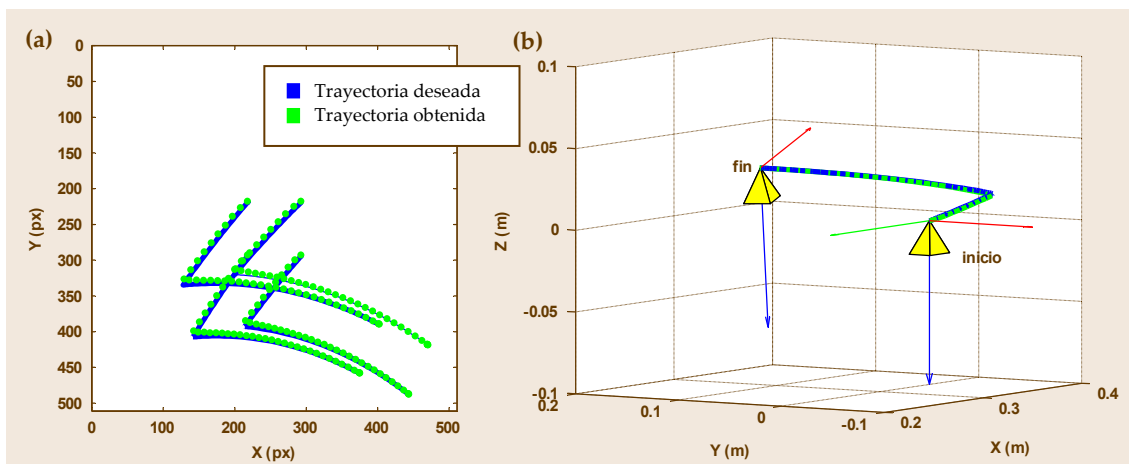


Fig. 5-33 Método de velocidad constante. Prueba 2. Trayectoria deseada y trayectoria obtenida durante el seguimiento. (a) Plano imagen (b) Espacio 3-D

La evolución del error en la imagen vuelve a mostrar, al igual que con la trayectoria del apartado anterior, que el método de velocidad constante obtiene referencias más cercanas a la posición actual para mantener la velocidad (ver Fig. 5-34).

En la Fig. 5-35.(a) se observa claramente cómo la trayectoria supone envíos de pares a la primera articulación negativos en un primer tramo, para posteriormente pasar a envíos positivos en el segundo tramo. En la segunda articulación también se observa el cambio en la trayectoria, al cambiar la pendiente de los pares enviados (ver Fig. 5-35.(b)). Si se compara con los pares enviados por el controlador del método de velocidad mínima para la misma trayectoria (ver Fig. 5-27), se puede concluir que el método de velocidad constante proporciona unos pares más constantes también durante el seguimiento.

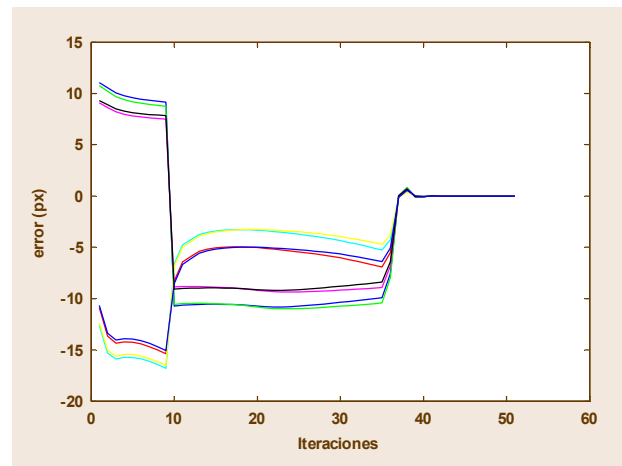


Fig. 5-34 Método de velocidad constante. Prueba 2. Error en imagen durante el seguimiento

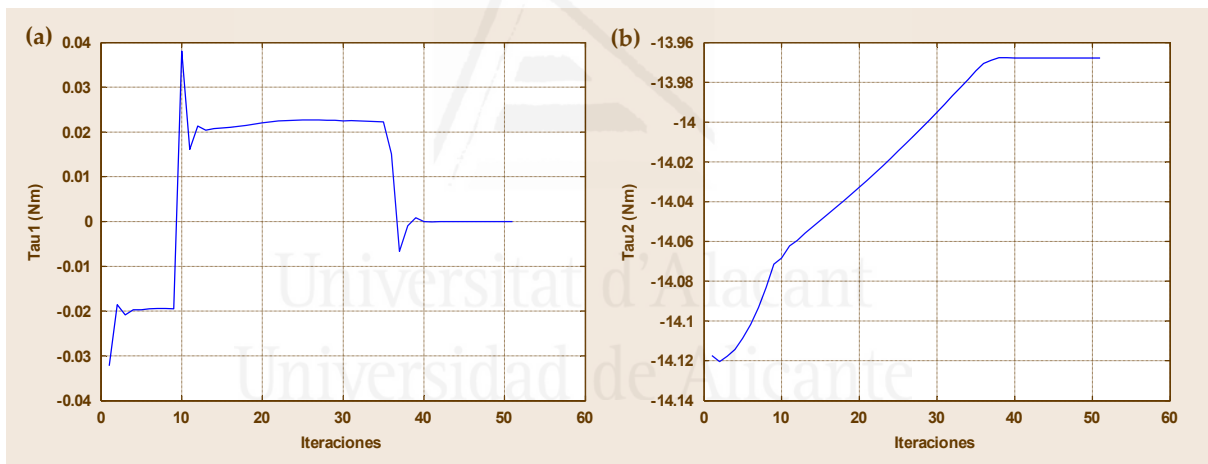


Fig. 5-35 Método de velocidad constante. Prueba 2. Par enviado por el controlador durante el seguimiento para: (a) la primera articulación (b) la segunda articulación

En cuanto a la velocidad de seguimiento, de nuevo, al igual que en la prueba anterior, se obtiene una velocidad lineal constante en módulo tal como se deseaba. La Fig. 5-36 muestra el control de esta velocidad deseada (se estableció en 2.7 mm/s), necesitando el controlador sólo unas pocas iteraciones más que el método de velocidad mínima para completar de forma precisa el seguimiento de la trayectoria predefinida.

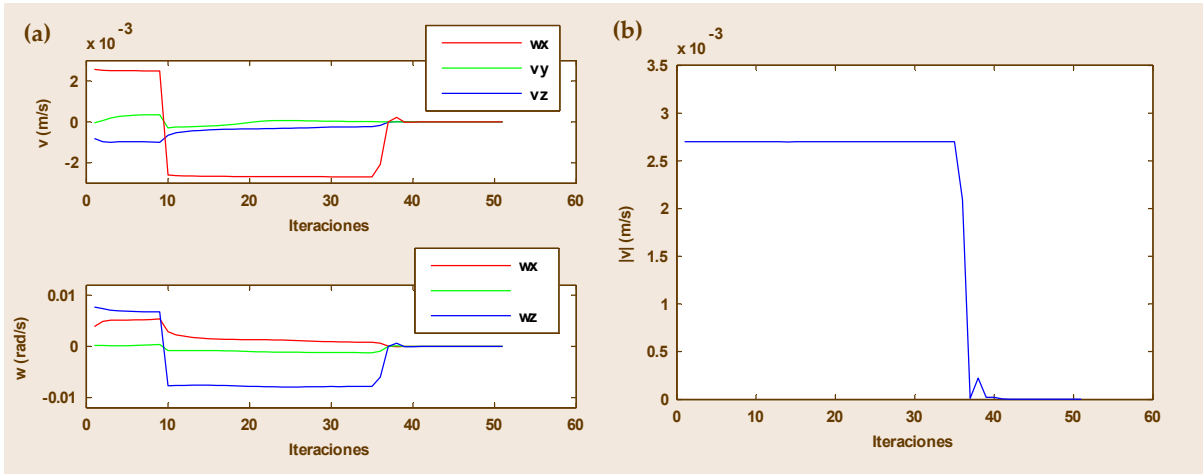


Fig. 5-36 Método de velocidad constante. Prueba 2. (a) Velocidad lineal y angular del extremo del robot durante el seguimiento (b) Evolución del módulo de la velocidad durante la tarea de seguimiento

### 5.4.4.3.3 Prueba 3

La última prueba que se realiza con el método de velocidad constante parte del robot en su posición inicial, esto es, sus dos articulaciones giradas 0 rad. Esta posición inicial sitúa los puntos en la imagen según  $s = [219 \ 219, 294 \ 219, 294 \ 294, 219 \ 294]$  px. Desde esta posición se pretende girar la primera articulación 0.4 rad y la segunda 0.15 rad. A partir de esta posición, la posición final de los puntos en la imagen se corresponde con  $s_d = [402 \ 390, 470 \ 419, 444 \ 488, 375 \ 459]$  px. Entre la posición inicial y final el robot debe seguir una trayectoria en imagen predefinida (ver Fig. 5-37.(a)).

La constante  $K_p$  elegida para esta tercera prueba ha sido la siguiente:

$$K_p = 1.9 \cdot \mathbf{I}_{8 \times 8} \text{ Nm/px}^2. \tag{5.14}$$

Y la matriz  $K_v$ :

$$K_v = \begin{pmatrix} 4.6 & 0 \\ 0 & 3.6 \end{pmatrix} \text{ Nms/rad}. \tag{5.15}$$

Esta última prueba pretende evaluar el comportamiento del sistema al indicarle una velocidad de seguimiento más elevada. En las pruebas anteriores se realizaba el seguimiento de la trayectoria con una velocidad de 2.7 mm/s. Esta velocidad permite visitar de manera más o menos precisa todas las referencias de la trayectoria deseada. El módulo de la velocidad lineal deseada es para esta prueba de 20 mm/s. Dado que la distancia que debe recorrer el extremo del robot es de aproximadamente 160 mm (ver Fig. 5-37.(b)), la tarea se completará en aproximadamente 8 segundos, un tiempo sensiblemente más adecuado para el desplazamiento que se pide en comparación con los aproximadamente 55 segundos que tardaba con 2.7 mm/s para recorrer una distancia similar.

Con estas condiciones iniciales, se obtiene la trayectoria en imagen mostrada en la Fig. 5-37.(a). Tanto esta trayectoria como la seguida por la cámara en el espacio Cartesiano 3-D (ver Fig. 5-37.(b)) se ajustan con precisión a las trayectorias deseadas en ambos espacios.

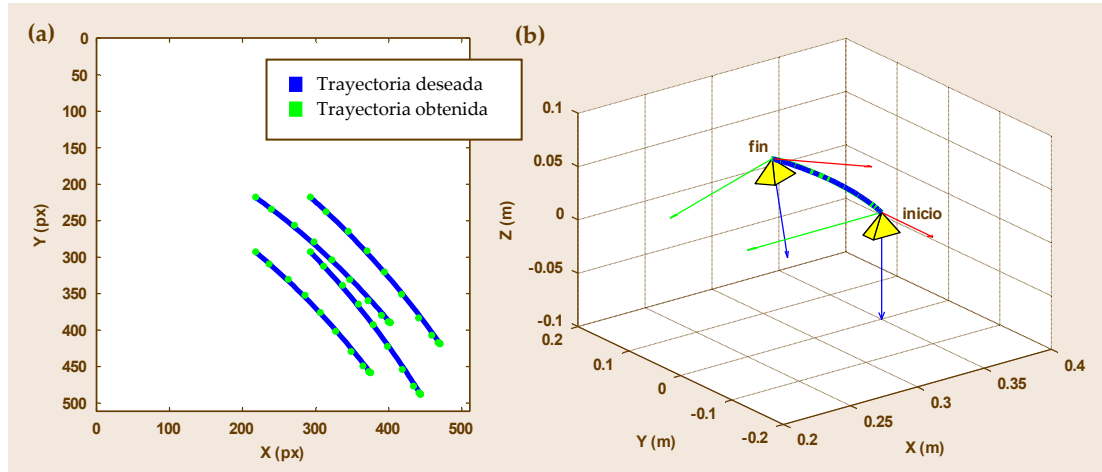


Fig. 5-37 Método de velocidad constante. Prueba 3. Trayectoria deseada y trayectoria obtenida durante el seguimiento. (a) Plano imagen (b) Espacio 3-D

La evolución del error en la imagen presenta un error elevado en las primeras iteraciones. Dado que se ha aumentado la velocidad de seguimiento, la diferencia en imagen entre la posición actual y la deseada que proporciona el método para mantener la velocidad constante también es mayor. (ver Fig. 5-38).

En la Fig. 5-39 se pueden ver los envíos de pares a la primera y segunda articulaciones. La Fig. 5-40 muestra el control de la velocidad deseada (se estableció en 20 mm/s). El menor número de iteraciones necesarias permite, sin embargo, alcanzar la posición final siguiendo de manera precisa la trayectoria predefinida y manteniendo la velocidad lineal del seguimiento constante. En esta prueba se muestra 1 iteración cada segundo. Por lo tanto, el seguimiento se completa en menos de 10 segundos.

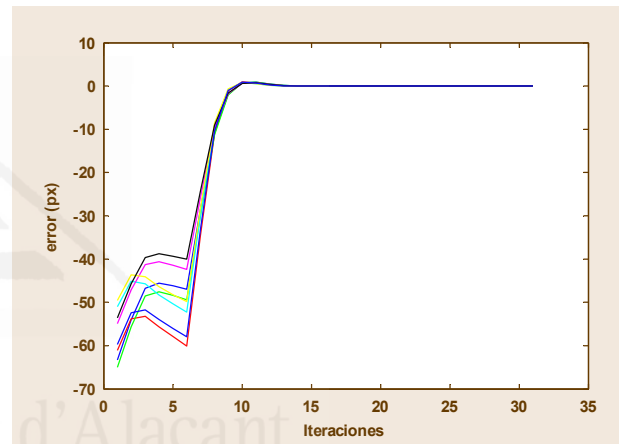


Fig. 5-38 Método de velocidad constante. Prueba 3. Error en imagen durante el seguimiento

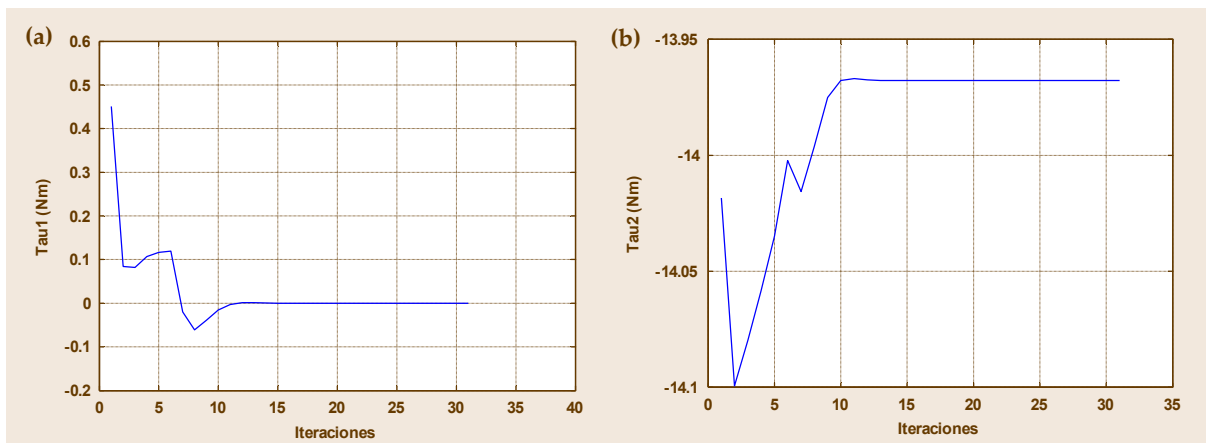


Fig. 5-39 Método de velocidad constante. Prueba 3. Par enviado por el controlador durante el seguimiento para: (a) la primera articulación (b) la segunda articulación

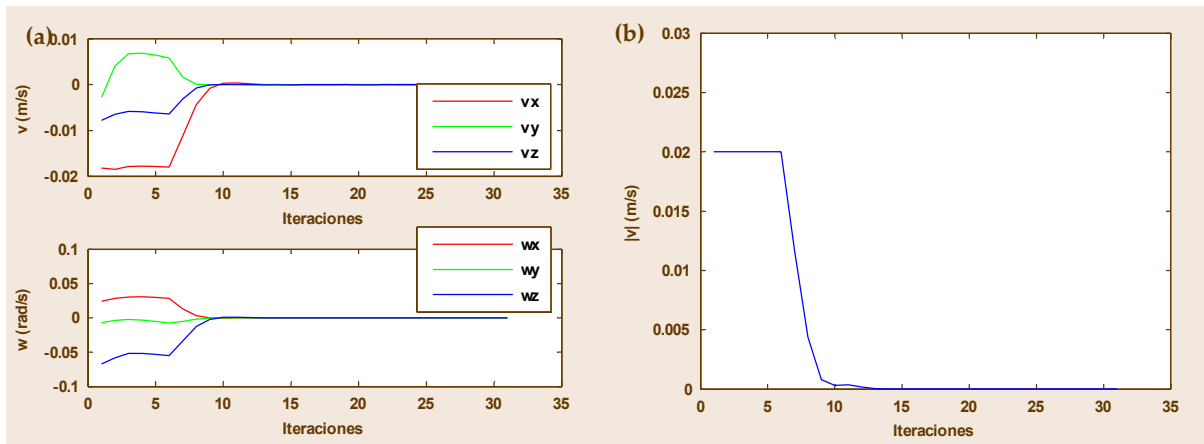


Fig. 5-40 Método de velocidad constante. Prueba 3. (a) Velocidad lineal y angular del extremo del robot durante el seguimiento (b) Evolución del módulo de la velocidad durante la tarea de seguimiento

## 5.5 Conclusiones

Los sistemas de control visual han incrementado enormemente su desempeño gracias a la incesante mejora de los sistemas de adquisición y procesamiento de imágenes. El resultado es que el proceso de adquisición y procesamiento de las imágenes es cada vez menor, desplazando el cuello de botella hacia el controlador del robot en los sistemas de control visual. Tradicionalmente, los sistemas robóticos industriales poseen un controlador cerrado que impide enviar directamente órdenes de bajo nivel como son los pares y fuerzas necesarios para realizar un determinado movimiento. Sin embargo, estos controladores propios de cada brazo robótico, introducen un retardo en cada iteración del bucle de control visual que podría ser eliminado. El principal problema que se suele encontrar a la hora de eliminar estos controladores es el de estimar con precisión el valor de los parámetros dinámicos de un sistema que no se ha diseñado, como la mayoría de brazos robóticos industriales. En el proceso de diseño y construcción de un brazo robótico se dispone, sin embargo, de la suficiente información para obtener estos parámetros dinámicos.

Partiendo de la base del diseño de un nuevo brazo robótico, en el presente Capítulo se han propuesto tres métodos de seguimiento de trayectorias en la imagen basados en control visual dinámico. Estos métodos presentan un comportamiento intemporal debido a que las características deseadas no dependen del tiempo. Se ha comprobado su correcto funcionamiento en diversas pruebas realizadas sobre un diseño de un robot de 2 grados de libertad simulado en Matlab/Simulink. No se ha encontrado ningún otro sistema en la literatura que realice un seguimiento en el plano imagen de trayectorias a partir de control visual directo basado en imagen.

Aunque los tres métodos propuestos han presentado un correcto comportamiento tanto en imagen como en 3-D, se debe tener en cuenta el carácter evolutivo de cada método respecto al método anteriormente descrito. Así, el primer método resuelve el problema de las referencias temporales avanzando en la trayectoria sólo cuando la siguiente referencia ha sido visitada. Para definir cuando una referencia ha sido visitada se comprueba en cada momento que el error en imagen desde la posición actual de las características visuales hasta la referencia sea menor que un umbral definido con an-

terioridad. En este momento, el sistema pasa a la siguiente referencia. De esta forma se tiene un sistema intemporal de seguimiento que, sin embargo, no tiene ningún control sobre la velocidad de seguimiento. El segundo método garantiza una velocidad mínima de seguimiento. Para ello, primero estima la velocidad que se aplicaría para llegar desde la posición actual hasta la siguiente referencia. El sistema itera sobre las referencias de la trayectoria en busca de la referencia que permita superar la velocidad deseada. El principal problema que presente este método es la imposibilidad de mantener la velocidad constante. El último método propuesto soluciona este problema. Para ello, y partiendo de la referencia del método de velocidad mínima que aseguraba superar la velocidad deseada, se interpola entre esta referencia y la anterior buscando la posición de la cámara entre las dos muestras de la trayectoria deseada que aseguran la velocidad deseada de seguimiento.

Las simulaciones realizadas sobre un prototipo de dos grados de libertad permiten comprobar el correcto funcionamiento de los esquemas de control propuestos para el guiado de un robot controlando los pares que se deben aplicar a sus articulaciones. En trabajos futuros, se pretende aplicar los algoritmos de control propuestos en este Capítulo y validados con las pruebas de simulación a un robot real que se construirá bajo el marco del proyecto MCYT “Manipulación inteligente mediante percepción háptica y control visual empleando una estructura articular ubicada en el robot manipulador (DPI2008-02647)”. En este aspecto, las pruebas realizadas en un entorno simulado no buscan optimizar los tiempos, sino más bien comprobar el correcto funcionamiento de los algoritmos propuestos para el seguimiento intemporal de trayectorias con control visual directo.





Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante

# Control visual-fuerza

## 6 Control visual-fuerza

Los robots manipuladores se han venido empleando en la industria generalmente en tareas muy estructuradas donde las posiciones de los elementos que intervienen en la tarea son conocidas de forma muy precisa. Cualquier cambio en la posición definida previamente para los objetos con los que el robot debe interactuar en una tarea puede provocar que ésta no se complete satisfactoriamente. Los sistemas de control visual descritos en los Capítulos previos permiten al robot posicionarse de forma relativa a los objetos implicados en la tarea. Sin embargo, en tareas en las que el robot debe interactuar con su entorno no basta con esta información visual para guiar al robot.

La información que proporciona un sensor de fuerza se debe tener en cuenta en tareas de interacción, donde el robot manipulador debe interaccionar con los objetos situados en el entorno. Las principales aproximaciones empleadas hasta la actualidad para el control simultáneo de la posición del extremo del robot y de la fuerza de interacción son el control híbrido y el control de impedancia.

El presente Capítulo describe una técnica para fusionar la información visual y la de fuerza basada en el esquema de

6.1	<b>Introducción</b> .....	155
6.1.1	Control visual-fuerza híbrido .....	158
6.1.2	Control de impedancia.....	163
6.1.3	Otras aproximaciones .....	165
6.2	<b>Fusión de control visual-fuerza basado en control de impedancia</b> .....	167
6.2.1	Esquema de control de impedancia con realimentación visual.....	168
6.2.2	Modificación de la trayectoria en la imagen a partir de las fuerzas de interacción .....	170
6.2.3	Detección de un cambio en la superficie .....	179
6.3	<b>Resultados</b> .....	183
6.3.1	Tareas de control visual manteniendo el contacto sobre una superficie .....	183
6.3.2	Tarea de inserción mediante control visual-fuerza.....	191
6.4	<b>Conclusiones</b> .....	193

control de impedancia, donde se utilizan dos estrategias distintas para modificar la trayectoria en imagen a partir de las fuerzas de interacción. También se presenta un método robusto para la detección de cambios en la curvatura de la superficie de contacto que utiliza información visual y de fuerza.

### 6.1 Introducción

Cuando un robot manipulador tiene que interactuar con su entorno, el control de posición no es suficiente para asegurar una correcta ejecución de la tarea [Suarez-1995]. Existen dos técnicas generales de uso común para controlar la interacción: control pasivo de interacción y control activo de interacción [Villani-2008]. El tipo de tarea de interacción define la posibilidad de adoptar una técnica u otra. La primera estrategia

implica que el robot está construido de tal manera que pueda adaptarse a la superficie de contacto en una tarea de interacción. Los robots flexibles son adecuados para este tipo de control de la interacción, ya que sus eslabones se pueden deformar para permitir la adaptación sin roturas. Con frecuencia, el control de interacción pasiva se realiza mediante el acoplamiento en el robot de una herramienta acomodaticia especial [De Fazio-1984]. Esta herramienta debe ser diseñada específicamente para una tarea en particular. El control pasivo de la interacción no requiere ningún sensor de medición de las fuerzas o los momentos ejercidos por el robot. Sin embargo, no es adecuado para realizar tareas con grandes errores entre la trayectoria prevista y la trayectoria final adaptada a la superficie, ya que está limitado por la adaptabilidad del robot. Además, la falta de un sensor de fuerza impide al control pasivo garantizar que no se presentarán grandes fuerzas de contacto. Los sistemas de control activo de interacción requieren el uso de un sensor de fuerza para medir y retroalimentar las fuerzas y los momentos ejercidos sobre el extremo del robot en la interacción con el objeto manipulado.

El control de fuerza activo se basa en el procesamiento de las fuerzas y momentos que se transmiten entre el robot y los objetos cuando entran en contacto. Estos valores de pares y fuerzas, que son registrados por sensores de fuerza instalados en el robot, son generalmente utilizados como entrada para las leyes de control que garantizan que la fuerza y los pares de contacto se regulan a una referencia predefinida adecuada para el desarrollo de la tarea robótica. De acuerdo con el esquema de control, el control activo de interacción puede dividirse en dos grupos: control de fuerza indirecto y control de fuerza directo [Villani-2008]. El primero alcanza el control de la interacción a través del control de movimiento, sin que se cierre de manera explícita un bucle de retroalimentación de fuerza (pertenece a este grupo el control de impedancia); el segundo permite controlar la fuerza y momentos de contacto a un valor deseado debido al cierre del bucle que permite retroalimentar las fuerzas y pares de interacción (pertenecen a este grupo el control de fuerza, control híbrido o el control paralelo). Estas aproximaciones se revisan en [De Schutter-1998]. La Tabla 6-1 muestra un resumen de la investigación desarrollada por los grupos españoles en el control de fuerza de robots manipuladores (en [GarcíaGJ-2009b] se describen con más profundidad cada uno de los trabajos mencionados en esta tabla).

Por otro lado, en tareas en las que el robot debe posicionarse con respecto a un objeto específico del entorno, puede hacerse uso de la información proporcionada por un sistema de visión y, en la actualidad, existe una gran cantidad de controladores visuales desarrollados con este motivo. Así, en aquellas tareas en las que se debe realizar la manipulación de un determinado objeto del espacio de trabajo se hace necesario el uso de forma combinada de los controladores visuales junto con controladores de fuerza. En este caso los sistemas de visión tienen la función de establecer la trayectoria del robot durante la tarea, actuando como controladores de posición, mientras el sistema sensor de fuerza se encarga de controlar la interacción del robot con el entorno.

Atendiendo a la fusión de estos dos sistemas sensoriales el principal problema que se encuentra es que ambos sistemas proporcionan información de naturaleza distinta ya que miden fenómenos físicos distintos, aunque complementarios. Este factor condiciona los sistemas desarrollados para fusionar la información obtenida por ambos. Así, los sistemas de visión proporcionan información global del espacio de trabajo, no sien-

do adecuados para controlar la interacción entre el robot y los objetos manipulados. Por otro lado, los sensores de fuerza proporcionan información acerca de la geometría del contacto, pudiendo únicamente controlar el movimiento descrito por el robot a partir de información local, es decir, de las fuerzas de contacto.

Tabla 6-1 Resumen de la investigación española en control de fuerza

Referencia	Técnica	Aplicación
[Suarez-1995]	Modelos geométricos analíticos	Tareas de ensamblado de precisión
[Cervera-1996]	Redes neuronales	Tareas de ensamblado de precisión
[Cervera-2002c]	Redes neuronales	Tareas de ensamblado de precisión
[Galvez-2003]	Control de admitancia con el controlador de fuerza en el espacio articular	Control de un robot con patas
[Amat-2004]	Control de posición/fuerza híbrido	Robot de servicios para tareas de afeitado y alimentación
[Montes-2004] [Nabulsi-2009]	Control de fuerza proporcional	Robot escalador
[Puente-2004]	Control de fuerza proporcional	Atornillado en una tarea de ensamblado
[GarciaJG-2005a] [GarciaJG-2007b]	Control de impedancia. Estimador de la fuerza de contacto	Pruebas del estimador de las fuerzas de contacto
[GarciaJG-2005b] [GarciaJG-2009]	Control de impedancia. Estimador autocalibrado de la fuerza de contacto	Pruebas del estimador autocalibrado de las fuerzas de contacto
[GarciaJG-2007a]	Control de impedancia y control de posición/fuerza híbrido	Arquitectura de software abierta para pruebas de tareas de interacción robótica
[Fraile-2008]	Control de posición-fuerza híbrido	Perforación de huesos en tareas quirúrgicas
[Prats-2008b]	Control de impedancia y control de posición-fuerza híbrido	Robot humanoide para tareas comunes con mobiliario del hogar
[Payo-2009]	Control de fuerza PID modificado en esquema alternado o compartido	Control del movimiento libre y restringido de un robot flexible
[Valera-2009]	Diferentes esquemas de control de fuerza directo y control de impedancia	Arquitectura de pruebas para el análisis de la respuesta mecánica de asientos de vehículos comerciales

Las principales aproximaciones empleadas hasta la actualidad para combinar información visual y de fuerza son control híbrido y control de impedancia (en los Apartados 6.1.1 y 6.1.2 se muestran más en detalle cada una de estas aproximaciones). En el

caso de control híbrido, el espacio de control se divide en direcciones controladas por fuerza y direcciones controladas por visión siendo requisito para aplicar esta estrategia el disponer de un conocimiento previo detallado de la geometría de la tarea y el entorno en el que se va a desarrollar. En el caso de emplear control de impedancia se especifica la relación dinámica entre fuerza y movimiento. En [Deng-2005] se muestra una revisión de esta última aproximación.

Atendiendo a los distintos niveles de fusión de visión y fuerza cabe mencionar el control alternado, en el que una dirección dada es controlada alternativamente por visión y fuerza, control híbrido, es decir, control de direcciones distintas con visión y fuerza simultáneamente, y control compartido, con el que se puede controlar una misma dirección empleando información visual y de fuerza simultáneamente.

Como se observará durante el desarrollo de este capítulo, la combinación de sistemas de control visual y fuerza constituye un campo de investigación reciente en el que la mayoría de las contribuciones se centran en control visual-fuerza híbrido. Aunque en menor proporción, también es posible encontrar estudios relativos a sistemas de control de impedancia para la combinación de estas informaciones. Es este motivo por el que en los dos siguientes apartados de este capítulo se describirán los trabajos existentes hasta la actualidad en control visual-fuerza híbrido y sistemas que combinan control visual con control de impedancia. En el Apartado 6.1.3 se muestran otros trabajos que si bien no se pueden encuadrar en ninguna de las dos aproximaciones anteriores, sí que utilizan distintas estrategias para la combinación de ambos sistemas sensoriales. En la [Tabla 6-2](#) se resume la investigación española en sistemas de control basados en visión y fuerza.

### 6.1.1 Control visual-fuerza híbrido

El esquema general de control híbrido fue propuesto originalmente por Raibert y Craig [Raibert-1981] consistente básicamente en seleccionar las direcciones del espacio de trabajo en las que debe controlarse el movimiento y las direcciones en las que debe controlarse la fuerza de interacción ejercida por el robot. De esta manera, el sistema presenta dos bucles de control separados para movimiento y fuerza, de forma que en las direcciones de control de posición se determina la posición actual y en las direcciones de control de fuerza se mide la fuerza de interacción sobre el medio. A partir de este esquema genérico de control híbrido, se obtiene un sistema control visual-fuerza híbrido cuando para las direcciones en las que debe controlarse el movimiento se emplea un sistema de control visual.

Dado que el control híbrido de fuerza-posición requiere separar en subespacios independientes las direcciones que deben controlarse con posición y las que se deben controlar por fuerza, en la literatura destacan trabajos como [Baeten-2002b, Baeten-2003] que extienden el formalismo “*task frame*” [Bruyninckx-1996, De Schutter-1988]. Haciendo uso de este formalismo, se especifica a alto nivel qué sistema sensorial es utilizado para cada dirección posible de movimiento en cada momento de la tarea.

Tabla 6-2 Resumen de la investigación española en control visual-fuerza

Referencia	Técnica	Aplicación
[Pedreño-2000] [LopezJ-2002]	Redes neuronales con estructura VAM que relaciona la información visual y táctil con las posiciones articulares	Tareas de posicionamiento y manipulación de objetos desconocidos
[Pomares-2003]	- Control visual-fuerza de impedancia - Control compartido basado en pesos	Inserción de una barra en un agujero en movimiento
[Prats-2004] [Prats-2005]	Control visual-fuerza híbrido	Robot asistente en bibliotecas
[Pomares-2005b]	Control visual-fuerza compartido	Tarea de desensamblado
[Pomares-2005a]	- Control visual-fuerza compartido - Sistema de seguimiento intemporal basado en flujo de movimiento	Diferentes tareas de interacción en seguimientos de trayectorias predefinidas
[GarciaGJ-2007a] [GarciaGJ-2009d] [Gil-2009]	- Control visual-fuerza compartido basado en la matriz de interacción fuerza-imagen - Sistema de seguimiento intemporal basado en control visual virtual	Cambio de una bombilla estropeada en una farola
[Pomares-2007c]	- Control visual-fuerza de impedancia - Modificación de la trayectoria en la imagen basada en la matriz de homografía	Diferentes tareas de interacción en seguimientos de trayectorias predefinidas
[Prats-2007] [Prats-2008a]	- Control visual-fuerza compartido - Control visual basado en posición	Robot de servicios para tareas de apertura de puertas de armarios
[Pomares-2008]	- Control visual-fuerza de impedancia - Detección de discontinuidades en las superficies basada en la matriz de homografía y luz estructurada	Diferentes tareas de interacción en seguimientos de trayectorias predefinidas en contacto con un objeto
[Prats-2009]	Control de posición-visual-táctil híbrido modificado por un control de fuerza de impedancia	Robot de servicios para tareas de apertura de puertas correderas

Para exponer el concepto de control híbrido se muestra a continuación la formulación de un sistema de control visual-fuerza híbrido. Esta aplicación, cuyo esquema general se muestra en la Fig. 6-1, consiste en la inserción de una varilla, que se encuentra en el extremo del robot, en un orificio presente en un plano por el cual se desplaza antes de realizar la inserción. En la Fig 6-2 se puede apreciar un detalle de cada fase de inserción. El robot manipulador acerca la varilla al agujero acercándose desde la izquierda (para este ejemplo se ha simplificado considerablemente la tarea,

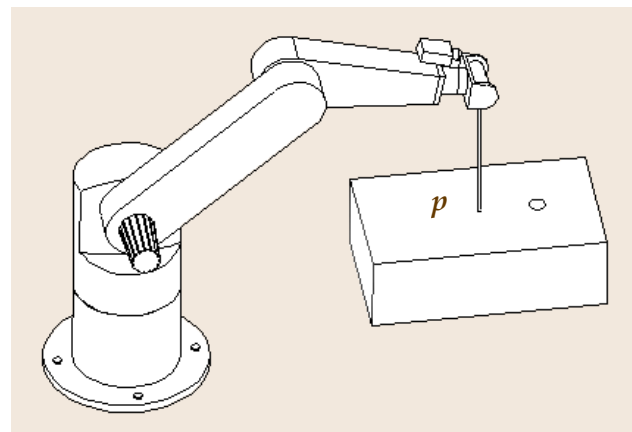


Fig. 6-1 Ejemplo de tarea de control visual-fuerza híbrido



considerando únicamente las direcciones X y Z). Este movimiento es un movimiento libre, en el que el sistema de control visual controla totalmente los grados de libertad del robot (Fig. 6-2.(a)). En el momento en el que se detecta un contacto con la superficie, se desliza la varilla sobre ésta hasta alcanzar el agujero. A partir de esta fase, comienzan a cambiar las restricciones que permiten completar correctamente la tarea, con lo que se debe dividir el espacio en dos partes: las direcciones controladas con el sistema de control visual, y las direcciones controladas con el sistema de control de fuerzas. Estas restricciones se modifican una vez se ha deslizado la varilla en el interior del agujero, con lo que se tendrán que modificar de nuevo los subespacios de control. Finalmente, se alcanza la posición final deseada cuando las fuerzas en la dirección del eje Z superan un umbral.

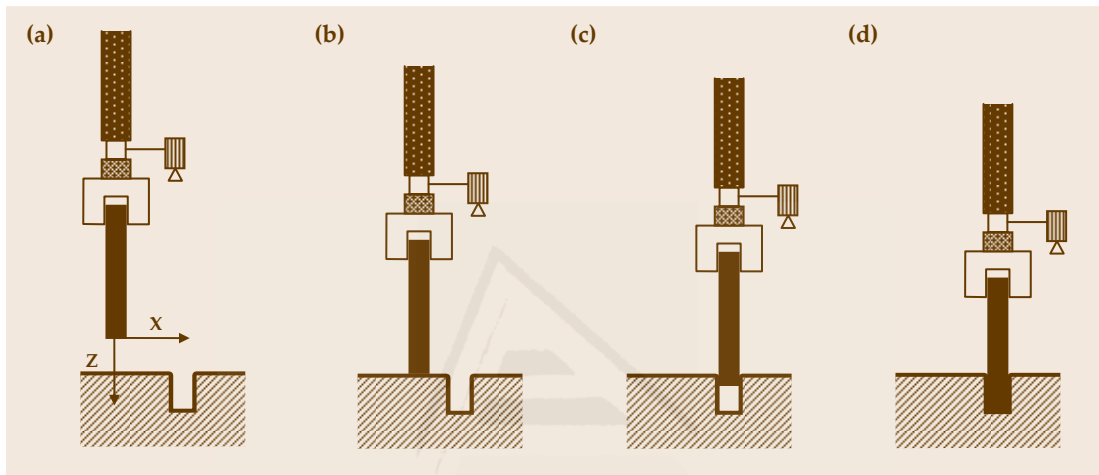


Fig. 6-2 Fases de la inserción: (a) Movimiento libre (b) Movimiento restringido por la superficie (c) La varilla comienza a introducirse en el agujero (d) La varilla toca el fondo del agujero y la tarea finaliza

El control híbrido comienza en la fase en la que se ha detectado un contacto con la superficie (Fig. 6-2.(b)). Para detectar este momento, se observa la fuerza en el eje Z. En este momento, se tiene una nueva situación con nuevas restricciones. La estrategia para la inserción es deslizar la varilla sobre la superficie en la dirección X mientras se aplican pequeñas fuerzas en Z para asegurar que se mantiene el contacto. Las restricciones atendiendo a que nos limitamos en este ejemplo a un control sobre los ejes X y Z serían las indicadas en la Fig. 6-3. El subsistema de fuerza será el encargado de mantener una fuerza de interacción constante entre la varilla y el plano (eje Z), mientras que el subsistema de visión determina la trayectoria a describir para alcanzar el orificio (trayectoria en las dirección X, es decir, tangente al plano).

```

TAREA deslizar varilla sobre superficie:{
Sistema de visión:
  vx: velocidad del sistema de control
        visual.
  wz: 0 rad/s.
Sistema de fuerza:
  fz: fuerza de contacto mínima.
}
  
```

tema de visión determina la trayectoria a describir para alcanzar el orificio (trayectoria en las dirección X, es decir, tangente al plano).

Cuando la varilla ha entrado en el agujero (ver (Fig. 6-2.(c))) las restricciones espaciales vuelven a cambiar. El momento en el que la varilla entra en el agujero puede detectarse fácilmente observando los cambios de posición en la dirección Z y esperando a que sobrepase un umbral.

Fig. 6-3 Especificación de la tarea de deslizamiento sobre la superficie

En este momento las restricciones que se deben incluir en la tarea son las mostradas en la Fig. 6-4. La tarea concluye cuando las fuerzas en Z alcanzan un umbral debido a que la varilla está tocando el fondo del agujero (ver (Fig. 6-2.(d))).

La mayoría de los sistemas de control visual-fuerza híbridos propuestos hasta la actualidad utilizan un sistema de cámara externo al robot. Entre los primeros trabajos de

```
TAREA insertar varilla:{
  Sistema de visión:
    vz: velocidad del sistema de control visual.
    wz: 0 rad/s.
  Sistema de fuerza:
    fx: 0 N.
}
```

Fig. 6-4 Especificación de la tarea de inserción de la varilla

este tipo cabe mencionar el sistema propuesto por Hosoda et al. [Hosoda-1998] que es aplicado para el seguimiento de superficies desconocidas. Para ello incluye un subsistema capaz de estimar los parámetros de la cámara utilizada y de reconocer la superficie con la que interactúa el robot midiendo las fuerzas de interacción y de rozamiento que sufre durante su movimiento. Con el fin de resolver el problema de la interacción con superficies desconocidas, en [Leite-2009] se desarrolla un método adaptativo para calcular la geometría de la superficie y mantener el extremo del robot ortogonal a la superficie en el punto de contacto durante la ejecución de la tarea. El sistema de visión presenta una configuración de cámara externa, mientras que para controlar las fuerzas y pares ejercidos sobre la superficie se utiliza un control de fuerza directa. En [Namiki-1999] se describe un sistema para el agarre de objetos en tiempo real que hace uso de información procedente de una cámara externa al robot y la obtenida de los sensores de fuerza introducidos en una mano robótica. Este trabajo se centra principalmente en el desarrollo de una arquitectura paralela que permita retardos del orden de 1 milisegundo en la captura y procesamiento de la información sensorial. En [Nelson-2001] se describe una aplicación de control visual-fuerza híbrido aplicado a la teleoperación en entornos virtuales. En [Pichler-2000] se muestra un sistema híbrido con cámara externa al robot que de nuevo hace uso únicamente de la información procedente del sensor de fuerza para determinar la orientación de la superficie de contacto según el robot se desplaza por la misma. Una estrategia semejante se describe en [Xiao-1998, Xiao-2000] para el seguimiento de superficies en entornos no estructurados.

De cara a mejorar la reconstrucción del entorno, en [Olsson-2002] se muestra un sistema de control visual-fuerza híbrido que hace uso de un par estereoscópico externo al robot. En este caso se emplea la información relativa a la cinemática del robot para reconstruir la ecuación del plano con la que interactúa el robot. Sin embargo, para ello se realiza la suposición de que ciertos parámetros de dicha ecuación son parcialmente conocidos, determinando únicamente algunos de ellos a través de la cinemática. Hassanzadeh [Hassanzadeh-2005] propone una arquitectura abierta para realizar un control híbrido de visión y fuerza en entornos no estructurados y de diferentes modos utilizando Matlab/Simulink. Permite también controlar el sistema desde Internet mediante un sistema háptico. En [Chang-2004] se presenta un sistema de control visual-fuerza híbrido para seguir un contorno mientras se regula la fuerza de contacto en superficies desconocidas. El principal problema que presenta en la reconstrucción es la necesidad de tener el sistema de visión previamente calibrado. Zhao y Cheah proponen un con-

trol visual-fuerza híbrido para manipuladores robóticos con incertidumbre tanto en la cinemática, como en la dinámica del robot, así como en la superficie que restringe los movimientos de éste [ZhaoY-2004]. El algoritmo de control se basa en una ley adaptativa con regresores de fuerza y gravedad. No presenta, sin embargo, un estudio teórico riguroso de la influencia de una mala calibración de la cámara.

En [Carelli-2004] se extiende el esquema general de control híbrido para considerar un banco de controladores que incluye, además del control de posición y fuerza tradicionales, controladores servovisuales y controladores de impedancia con realimentación de fuerzas físicas o ficticias. El enfoque adoptado en [Lippiello-2007c] se basa en el esquema clásico de control de posición/fuerza híbrido [Raibert-1981], que exige un conocimiento exacto de la geometría del entorno descrito en forma de limitaciones impuestas al extremo del robot. Esta hipótesis se relaja en el sentido de que la geometría del entorno se supone conocida, pero no su posición y orientación con respecto al efector final del robot. La transformación relativa se estima on-line a partir de todos los datos de los sensores disponibles, es decir, el sistema visual, el sensor de fuerza y los sensores de posición de las articulaciones, utilizando el filtro de Kalman extendido.

El robot bibliotecario de la UJI es un robot diseñado por Prats et al. para ayudar a los usuarios de una biblioteca [Prats-2004]. El robot tiene que buscar y extraer el libro solicitado. En [Prats-2005] se detallan los algoritmos utilizados para la localización y la manipulación del libro. La manipulación de libros se realiza con un controlador visual/fuerza híbrido. Se consideran dos grados de libertad: la dirección perpendicular al libro se controla con la información procedente del sensor de fuerza, mientras que la dirección paralela se controla con un sistema de control visual basado en imágenes mediante el uso de los bordes del libro como características visuales.

Aunque en la literatura, el control visual-fuerza híbrido está muy extendido, este tipo de sistemas híbridos requieren conocer de antemano con precisión la geometría del entorno en el que se desarrolla la tarea con el objetivo de realizar la división entre direcciones controladas por visión y direcciones controladas por fuerza. Por lo tanto, esta aproximación en general no puede aplicarse en entornos en los que el robot puede interactuar con objetos desconocidos o incluso colisionar con obstáculos. Por otro lado, la división del espacio de trabajo realizada por estos sistemas implica que ambos sistemas sensoriales no pueden emplearse simultáneamente para controlar una dirección dada. Estos dos motivos han propiciado la creación de un nuevo sistema de fusión control visual-fuerza (descrito en este Capítulo) que evita las limitaciones de los sistemas híbridos permitiendo controlar la interacción con objetos desconocidos o incluso entornos no estructurados. Además, la estrategia propuesta permite hacer uso de control visual y fuerza simultáneamente para controlar una misma dirección dada de movimiento aprovechando la información proporcionada por cada sistema sensorial y fusionando las mismas para obtener un mejor comportamiento que el que se obtendría con la utilización de uno único. Para conseguir esto, el sistema propuesto parte del control de impedancia. En el siguiente Apartado se introduce el concepto de control de impedancia y se destacan los principales trabajos relacionados con este esquema de control.

### 6.1.2 Control de impedancia

La principal diferencia entre una aproximación de control directo de la fuerza (como el control híbrido) y una aproximación de control indirecto de las fuerzas y pares reside en que la última aproximación alcanza el control de la fuerza a partir del control del movimiento sin cerrar explícitamente el bucle de control de las fuerzas y pares de contacto. El control de impedancia pertenece a este último grupo [Hogan-1985]. Frente al control de fuerza clásico desarrolla el control dinámico entre el movimiento y la fuerza de interacción del robot. Para conseguirlo se especifica una impedancia deseada que se obtiene mediante el filtrado de las fuerzas de interacción de la siguiente manera:

$$x_i(t) = \frac{F(t)}{Is^2 + Ds + K}, \quad (6.1)$$

donde  $I \in \mathcal{R}^{n \times n}$  es la matriz de inercia,  $D \in \mathcal{R}^{n \times n}$  es la matriz de amortiguamiento y  $K \in \mathcal{R}^{n \times n}$  es la matriz de elasticidad. Estas matrices son diagonales y caracterizan la función de impedancia deseada. A partir de la expresión (6.1) se obtiene un vector de ajuste,  $x_i$ , que modifica la trayectoria deseada,  $x_d$ . En la Fig. 6-5 se muestra el esquema general de un sistema de control de impedancia.

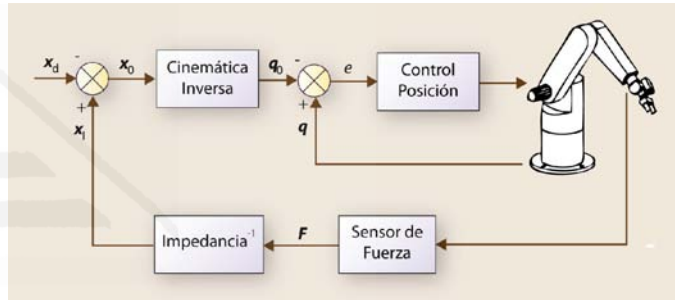


Fig. 6-5 Esquema de control de impedancia

Si se atiende a la forma en que se alcanza el control de impedancia se puede afirmar que existen dos tipos básicos: control pasivo y activo. En el control pasivo se emplean elementos mecánicos para alcanzar la impedancia deseada, mientras que en el control activo la realimentación de fuerza es utilizada para controlar el movimiento del robot. Los sistemas de control de impedancia activo suelen clasificarse en dos grupos principalmente:

- *Control de impedancia basado en fuerza.* En este caso el bucle de más bajo nivel es una realimentación de fuerza, con lo que el robot reacciona a una desviación de su movimiento generando fuerzas y pares.
- *Control de impedancia basado en posición.* En este caso se hace uso en bajo nivel de un controlador de posición. El robot genera una desviación del movimiento deseado como método de reacción a las fuerzas de interacción. Estos sistemas se denominan sistemas de control de admitancia.

Los sistemas de control de impedancia basados en fuerza ofrecen un mejor comportamiento con respuestas más suaves generalmente que los sistemas de control de admitancia [Lawrence-1988]. Sin embargo, se requiere un modelo dinámico del robot para garantizar su estabilidad. En principio, los sistemas de control indirecto de las fuerzas no requieren medidas de las fuerzas y pares de contacto. Si no se tienen estas medidas, la impedancia resultante es típicamente no lineal y acoplada. Sin embargo, si se dispone de las medidas proporcionadas por un sensor de fuerza, se puede obtener

un comportamiento lineal y desacoplado. En las distintas estrategias control visual-fuerza propuestas en esta Tesis se supondrá la utilización de control activo basado en posición.

A partir del esquema de control de impedancia básico mostrado en la Fig. 6-5, existen modificaciones como la descrita en [Morel-1998, Pomares-2003], en la que se agrega un bucle de control externo consistente en un controlador visual que genera referencias ( $x_d$  en la Fig. 6-5) para un sistema de control de impedancia. Este sistema hace uso de una cámara ubicada en el extremo del robot y se aplica a tareas de acoplamiento entre piezas. Frente a otras aproximaciones como la descrita en [Nelson-1996b] en la que los sistemas de visión y fuerza actúan en el mismo nivel de la jerarquía de control, la descrita en [Morel-1998] se caracteriza por presentar un bucle de visión externo dispuesto alrededor del bucle de control de posición. Esta misma técnica se aplica en [Pomares-2003].

En [Prats-2009] se presenta un controlador visual/fuerza/táctil híbrido que es modificado por un control de impedancia para abrir una puerta corredera con el robot de servicio de la UJI. Esta plataforma robótica está compuesta por un manipulador robótico con una mano de tres dedos de Barrett, un sensor de fuerza situado en la muñeca, un sensor táctil para cada dedo de la mano y una cámara en configuración "eye-in-hand". En primer lugar, se ejecutan tres controladores independientes: un controlador de posición, un controlador visual y un controlador táctil. Las tres velocidades calculadas por estos controladores se combinan utilizando un esquema de control híbrido que utiliza cada velocidad para una dirección distinta del espacio Cartesiano. La velocidad obtenida a partir de este controlador híbrido es luego modificada por un controlador de impedancia que asegura que la mano del robot aplica la fuerza necesaria para abrir la puerta. En [Prats-2010] se propone un esquema global basado en sensores para la especificación y control robusto de tareas de interacción física, donde se consideran conjuntamente el agarre y la tarea sobre la base del formalismo "task frame" y la aproximación basada en conocimiento para el agarre.

La estimación de la posición y orientación de la superficie de interacción descrita en [Lippiello-2007c] utilizando un filtro extendido de Kalman permite obtener la realimentación de posición de un controlador de impedancia clásico. En [Lippiello-2007a] se aplica este estimador para obtener un sistema de control de impedancia basado en visión. En [Huang-2007] se describe un sistema de inyección en células. La tarea de inyección de células es una tarea compleja que requiere de personal experto para su realización manual. Para obtener un sistema automático de garantías, se propone un algoritmo de control de impedancia basado en visión. Las imágenes que proporciona el microscopio permiten controlar la deformación y obtener una relación entre la fuerza de inyección (medida por el microsensor de fuerza) y el desplazamiento de la membrana celular. Wen et al. emplean control de impedancia en [Wen-2008] para el control de un dispositivo háptico utilizado para la interacción con entornos virtuales. La realimentación visual del controlador permite obtener respuestas más precisas. El sistema se prueba sobre dispositivos de 1 y 2 grados de libertad únicamente.

Un aspecto importante que se ha explotado en la literatura sobre los sistemas de control de impedancia es la posibilidad de introducir fuerzas ficticias para aplicarlo a tareas de aproximación sin contacto. En [Tsuji-1999] se hace uso de un sistema de con-



trol de impedancia sin contacto aplicado a un robot redundante. Esta aproximación emplea la información visual de una cámara externa fija para generar una fuerza virtual entre cada articulación del robot y el medio. En [Nakabo-1998] se describe el concepto de impedancia visual y se define un contacto virtual con una superficie virtual en la imagen. En este caso las fuerzas ficticias modifican las señales de control generadas por un sistema de control visual, obteniendo las correspondientes acciones de control. Por último, dentro del ámbito de la utilización de sistemas de control de impedancia visual junto con fuerzas ficticias destacan los trabajos [Mut-1998, Carelli-2004] en los que se considera una estructura de control de impedancia donde la fusión de la información visual y de fuerzas (físicas o ficticias) se realiza en el plano imagen. Por lo tanto, el objetivo de control de impedancia visual resulta definido como la relación dinámica entre las fuerzas y el error de las características en la imagen. En estos trabajos se define también distintas estrategias para la generación de las fuerzas ficticias, que en cualquier caso suele tratarse de una función de la distancia entre el extremo del robot y el objeto implicado en la tarea.

En [Pomares-2005b, Pomares-2006a] se propone un sistema de control de impedancia que utiliza un sistema de control visual que ofrece la posibilidad de hacer un seguimiento de una trayectoria, evitando las restricciones temporales y sin conocimiento previo de los parámetros intrínsecos de la cámara. A lo largo de este Capítulo se describirá un esquema de impedancia novedoso realimentado con la referencia de velocidad obtenida con el sistema de seguimiento intemporal de trayectorias basado en control visual virtual presentado en esta Tesis.

### 6.1.3 Otras aproximaciones

Otra aproximación muy utilizada para resolver el problema de controlar el robot utilizando información visual y de fuerza es el control compartido. En un control compartido, existe un sistema supervisor que trata de resolver qué subsistema de control se debe encargar en cada momento de guiar al robot. Como ejemplo de esta aproximación cabe citar el concepto de “*resolvability*” [Nelson-1996a], que proporciona un indicador acerca de la “calidad” de la información obtenida a partir de cada sensor o su utilidad para guiar el robot en un instante dado de la tarea. Este indicador es seleccionado para determinar el sensor a utilizar en cada momento. También es posible encontrar otras aproximaciones que emplean una combinación de la información de visión y fuerza, como los trabajos de Zhou, Nelson y Vikramaditya [Nelson-1997, Zhou-1998] aplicados a micro-manipulación, en los que se define un elemento supervisor que determina el sistema sensorial más adecuado a aplicar en cada momento. Cabe mencionar asimismo otros trabajos como [Jörg-2000] aplicados a un sistema de ensamblaje flexible que emplea un sistema multisensorial. Para desarrollar esta tarea se hace uso de control compartido de forma que una dirección dada de movimiento es controlada alternativamente por cada sistema sensorial dependiendo del estado de la misma.

Otra técnica que destaca para fusionar la información visual y de fuerza son los controladores borrosos. Así, Von Collani y otros [von Collani-1999, von Collani-2000] emplean una solución “*neuro-fuzzy*” para la aplicación del control visual y de fuerza combinado a una tarea de posicionamiento que requiere alta precisión.



Aplicando el formalismo “*task frame*” también es posible encontrar trabajos encaminados al control de una dirección dada de movimiento simultáneamente haciendo uso de visión y fuerza [Baeten-2002a, Baeten-2003].

En [Malis-2001] se describe la utilización de distintos sistemas sensoriales para el control de una tarea. Dentro de estos sistemas sensoriales se profundiza en el empleo de sistemas de visión y fuerza para una tarea de inserción. Esta estrategia supone una extensión a la aproximación de función de la tarea [Samson-1991].

Un sistema de control visual basado en imagen no permite conocer la trayectoria 3-D seguida por el robot hasta alcanzar la configuración deseada. Así, empleando este tipo de sistemas, únicamente se dispone del conocimiento del valor de las características deseadas obtenidas en la imagen una vez que la tarea ha finalizado, pero no qué trayectoria se describirá hasta alcanzar estas características. Este aspecto se convierte en crítico en tareas en las que el robot debe interactuar con el entorno. Pomares y Torres [Pomares-2005c, Pomares-2007b] describen una aproximación, denominada control visual basado en flujo de movimiento, que permite garantizar el correcto seguimiento de una trayectoria especificada en el espacio de la imagen, presentando un correcto comportamiento tanto en la imagen como en el espacio 3-D.

Por último, basadas en una nueva formulación del principio de ortogonalización usado en control de fuerza, en [Dean-León-2005a, Dean-León-2005b] se trata una aproximación llamada principio de ortogonalización visual que consigue una convergencia simultánea de la posición visual restringida y de la fuerza de contacto entre el extremo del robot y la superficie que restringe el movimiento.

En el siguiente Apartado se describen las principales aportaciones de esta Tesis en el campo de la fusión de visión y fuerza para el control de un robot manipulador. Se parte de un control de impedancia en el que la referencia de posición se obtiene a partir del método de seguimiento de trayectorias descrito en el Capítulo 3. Cuando el robot entra en contacto con la superficie de un objeto, es necesario replanificar la trayectoria deseada en imagen del sistema de seguimiento. De esta forma, se consigue que la acción de control del controlador visual sea coherente con la acción de control del controlador de fuerza. En la siguiente Sección se propondrán dos métodos para realizar esta replanificación de la trayectoria en el espacio imagen. El sistema de control visual-fuerza propuesto es capaz, con esta replanificación de la trayectoria, de desplazarse sobre una trayectoria deseada interactuando con los objetos de la escena. Sin embargo, el sistema requiere la presencia de algún subsistema capaz de detectar cambios en la superficie sobre la que se está desplazando el robot. Cuando se encuentra un cambio en esta superficie, la trayectoria en imagen debe ser de nuevo replanificada. Para detectar estos cambios en la superficie de contacto, se propone un método original que parte de información visual y de fuerza.

## 6.2 Fusión de control visual-fuerza basado en control de impedancia

En este apartado se va a describir un sistema de control visual-fuerza que permite al robot interactuar con el entorno. La Fig. 6-6 muestra un esquema del sistema propuesto.

Este sistema consta de tres bloques principales:

- Un controlador de impedancia que es realimentado con información visual. El esquema de impedancia clásico permite controlar la posición del extremo del robot al tiempo que controla la fuerza de interacción. En el Apartado 6.2.1 se modifica la referencia de posición por la referencia del controlador visual [Pomares-2008].
- Un sistema que permite modificar la trayectoria deseada en la imagen a partir de la información proporcionada por el sensor de fuerza. En la Sección 6.2.2 se mostrarán dos técnicas distintas para replanificar la trayectoria deseada en la imagen que permite al controlador visual obtener la referencia de posición para el esquema de control de impedancia. La replanificación de la trayectoria es necesaria para mantener la coherencia entre las acciones de control distintas obtenidas por visión y por fuerza.
- Un mecanismo que permite detectar cambios en la superficie de contacto. El método propuesto en la Sección 6.2.3 parte de la información de las fuerzas de interacción y de la información proporcionada por un láser para obtener de forma precisa el momento en el que se produce un cambio en la superficie de contacto. Así, una vez que se detecte un cambio en la superficie se puede recalcular la trayectoria en imagen de forma que las fuerzas de interacción corrijan la trayectoria deseada que el sistema de seguimiento debe repetir.

El esquema mostrado en la Fig. 6-6 se introduce en [Pomares-2004a]. En su Tesis, Pomares describe cada una de las fases del esquema y propone un sistema que permite detectar posibles errores en la orientación del robot con respecto a la superficie de interacción. Sin embargo, partiendo de este esquema básico, en la presente Tesis se han realizado las siguientes aportaciones:

- En el Apartado 6.2.3 se propone una técnica que mejora la detección de las zonas de ruptura en la superficie con la que se está interactuando [Pomares-2008]. Este detector de rupturas se basa en la fusión de información visual y de fuerza y combina el método de detección de rupturas descrito en la Tesis de Pomares con un detector de rupturas desarrollado en [Gil-2006] que utiliza luz estructurada para, mediante visión, detectar un cambio en la superficie.
- Una vez se ha detectado un cambio en la superficie, se debe modificar la trayectoria en la imagen para que el sistema de control visual siga enviando referencias válidas de acuerdo con las fuerzas y pares de interacción medidos por el sensor de fuerza. En este aspecto, se proponen dos métodos que modifican la trayectoria deseada en imagen a partir de la información que proporciona el sensor

de fuerzas. El primero de ellos utiliza las matrices de homografía proyectiva para recalcular la trayectoria deseada en imagen con la ventaja de obtener la trayectoria de manera independiente ante errores en la estimación de los parámetros intrínsecos de la cámara [Pomares-2007c]. El segundo método propuesto utiliza la matriz de interacción fuerza-imagen para obtener las variaciones en la posición de las características en imagen con relación a las variaciones deseadas en las fuerzas de contacto [GarciaGJ-2007a]. Estas técnicas se describen en el Apartado 6.2.2.

- Para guiar al robot se utiliza un sistema de impedancia donde la referencia de posición se ha substituido por el sistema de seguimiento descrito en el Capítulo 3.

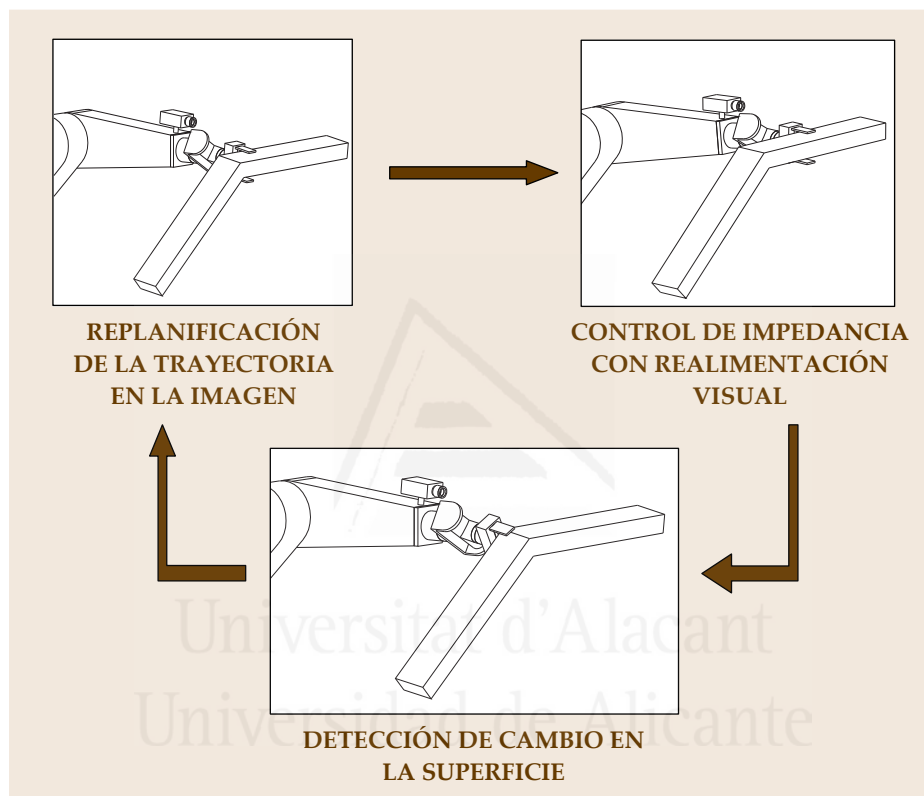


Fig. 6-6 Esquema del sistema propuesto de control de la interacción con el entorno

### 6.2.1 Esquema de control de impedancia con realimentación visual

Hasta ahora, la mayoría de las aplicaciones desarrolladas para combinar información visual y de fuerza emplean el control híbrido descrito en el apartado anterior. En estos casos, el espacio de trabajo debe ser conocido de forma muy precisa, de forma que se pueda dividir primero las direcciones controladas mediante fuerza de aquellas que lo serán por posición (es decir, por un sistema de control visual). Con la intención de incrementar la versatilidad del sistema y de mejorar su respuesta ante las incertidumbres que aparecen durante la tarea de manipulación, se ha desarrollado un sistema especial de control de impedancia visual [Pomares-2007c] que constituye una de las aportaciones de la presente Tesis. Este sistema utiliza la información obtenida a partir del seguimiento intemporal de trayectorias en la imagen descrito en el Capítulo 3 y dispone de una realimentación visual externa, en contraste con otras aproximaciones

[Nelson-1996b] que tienen los sistemas de visión y fuerza en el mismo nivel de la jerarquía de control.

La técnica elegida para desarrollar el controlador de visión y fuerza es el control activo basado en posición. En el control activo, la realimentación de fuerza se usa para controlar los movimientos de las articulaciones. La siguiente ecuación de impedancia establece un comportamiento en base a una determinada inercia, amortiguamiento y elasticidad para el desplazamiento en posición cuando el extremo del robot ejerce una fuerza  $F$  en el entorno:

$$F = \mathbf{I}\Delta\ddot{\mathbf{x}}_{vc} + \mathbf{D}\Delta\dot{\mathbf{x}}_{vc} + \mathbf{K}\mathbf{x}_{vc}, \quad (6.2)$$

donde  $\mathbf{x}_c$  es la posición actual del extremo del robot,  $\mathbf{x}_v$  es la trayectoria de referencia,  $\Delta\mathbf{x}_{vc} = \mathbf{x}_v - \mathbf{x}_c$ ,  $\mathbf{I} \in \mathfrak{R}^{n \times n}$  es la matriz de inercia,  $\mathbf{D} \in \mathfrak{R}^{n \times n}$  es la matriz de amortiguamiento y  $\mathbf{K} \in \mathfrak{R}^{n \times n}$  es la elasticidad. Todas son matrices diagonales y caracterizan la función de impedancia deseada.

Para implementar este controlador, se ha introducido una realimentación visual externa en el esquema de control de impedancia con una realimentación interna de movimiento. Para la implementación se ha elegido un sistema de control de impedancia basado en posición llamado control de acomodación [Whitney-1977] en el que la impedancia deseada está limitada a un amortiguamiento puro  $\mathbf{D}$  (en [Malis-2001] se muestran los principales aspectos de la estabilidad de este tipo de control). En este caso:

$$F = \mathbf{D}\Delta\dot{\mathbf{x}}_{vc}. \quad (6.3)$$

Por lo tanto, la ley de control obtenida será:

$$\dot{\mathbf{x}}_c = \dot{\mathbf{x}}_v - \mathbf{D}^{-1}F, \quad (6.4)$$

donde el término  $\dot{\mathbf{x}}_v$  se obtiene usando el método de seguimiento intemporal de trayectorias en la imagen basado en control visual virtual descrito en el Capítulo 3.

$$\dot{\mathbf{x}}_v = -\lambda \cdot \mathbf{C}_v \cdot \hat{\mathbf{I}}_s^+ \cdot (\mathbf{s} - \mathbf{j}\mathbf{s}), \quad (6.5)$$

donde la velocidad se transforma desde el sistema de coordenadas de la cámara al del extremo del robot usando la matriz  $\mathbf{C}_v$ .

En la Fig. 6-7 se muestra el esquema del control de impedancia propuesto. En esta figura el componente de cinemática inversa implementa un algoritmo convencional de Jacobiana inversa,  $\dot{\mathbf{q}}_c = \mathbf{J}_q^+ \dot{\mathbf{x}}_c$ , donde  $\dot{\mathbf{q}}_c$  son las correspondientes velocidades de las articulaciones y  $\mathbf{J}_q^+$  es la pseudo inversa de la matriz Jacobiana del robot.

Por lo tanto, definiendo el amortiguamiento deseado  $\mathbf{D}$ , la información procedente de ambos sensores se combina como muestra la Ecuación (6.4). De esta forma, la trayectoria generada por el sistema de seguimiento intemporal de trayectorias basado en control visual virtual se corrige de acuerdo con la interacción del robot.

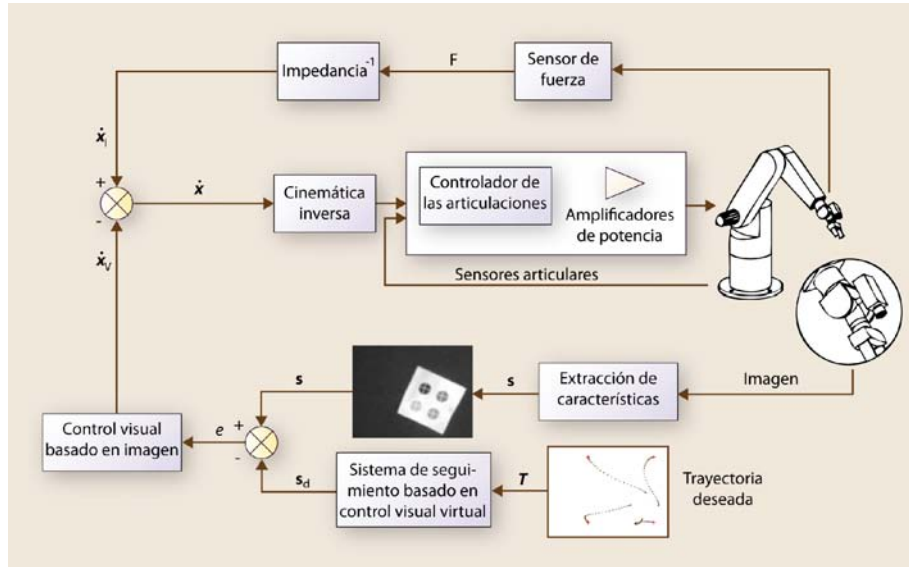


Fig. 6-7 Esquema del control de impedancia con realimentación visual

## 6.2.2 Modificación de la trayectoria en la imagen a partir de las fuerzas de interacción

### 6.2.2.1 Método basado en la matriz de homografía 2-D

La mayoría de las aproximaciones para fusionar la información visual y la de fuerza no consideran la posibilidad de que ambos sensores aporten información contradictoria en un momento dado de la tarea (es decir, el sistema de control visual establece una dirección de movimiento que es imposible de acuerdo con la información de interacción obtenida a partir del sensor de fuerza). En [Pomares-2004a] se describe un método capaz de modificar la trayectoria deseada en la imagen a partir de la información de las fuerzas de interacción. Sin embargo, la aproximación propuesta por Pomares no permite asegurar una correcta modificación de la trayectoria ante errores en los parámetros intrínsecos de la cámara. En este apartado se presenta una aproximación que sí permite asegurar una correcta modificación de la trayectoria deseada en imagen a partir de las fuerzas y pares de contacto, independientemente de los errores cometidos en la estimación de los parámetros internos de la cámara.

Para asegurar que una determinada tarea en la que se requiere una interacción con el entorno se desarrolla correctamente, el sistema debe llevar a cabo una variación de la trayectoria en la imagen, dependiendo de las restricciones espaciales impuestas por las fuerzas de interacción. Para conseguirlo, dada una colisión con el entorno de trabajo y habiendo reconocido el vector normal  $n$  a la superficie de contacto [Pomares-2005b], se determina la transformación que debe llevar a cabo la cámara para cumplir las restricciones espaciales. Esta transformación, dada por una matriz de rotación  $\mathbf{R}$  y una traslación  $t$ , se calcula de forma que represente la dirección más cercana a la obtenida a partir del seguimiento intemporal de trayectorias en la imagen basado en control visual virtual, y que está contenida en el plano de la superficie.

Por lo tanto, para garantizar que la información visual sea coherente con la obtenida del sensor de fuerza, la trayectoria en la imagen se debe modificar, de forma que la nueva trayectoria es la obtenida a partir de la transformación previamente menciona-

da. Para conseguirlo, se vuelve a utilizar el concepto de matriz de homografía descrito en el Apartado 3.4. Esta matriz,  $\mathbf{G}$ , relaciona los puntos vistos desde una configuración de la cámara con los mismos puntos observados desde otra posición de la cámara. Si se calcula la matriz  $\mathbf{G}$  en cada iteración (es decir, cada vez que se captura una imagen) de acuerdo con la transformación obtenida tras detectar una colisión (a partir de la matriz de rotación  $\mathbf{R}$  y de la traslación  $t$ ), se podrá obtener la nueva trayectoria en el espacio imagen.

Primero, considérese  $\Pi$  el plano de la superficie de contacto. Una vez que la colisión se detecta, considerando  $P_i$  un punto 3-D observado por la cámara (que representa una característica extraída del objeto), el mismo punto en el espacio imagen es  $f_i$ .  ${}^k f_i$  representa la posición de la característica en la imagen capturada en una posición intermedia  $k$  de la cámara. En la imagen de destino (que se corresponde con la imagen obtenida por la cámara colocada en la posición final de la trayectoria), el mismo punto se localizará en la posición  ${}^N f_i$  (esta notación se ilustra en la Fig. 6-8).

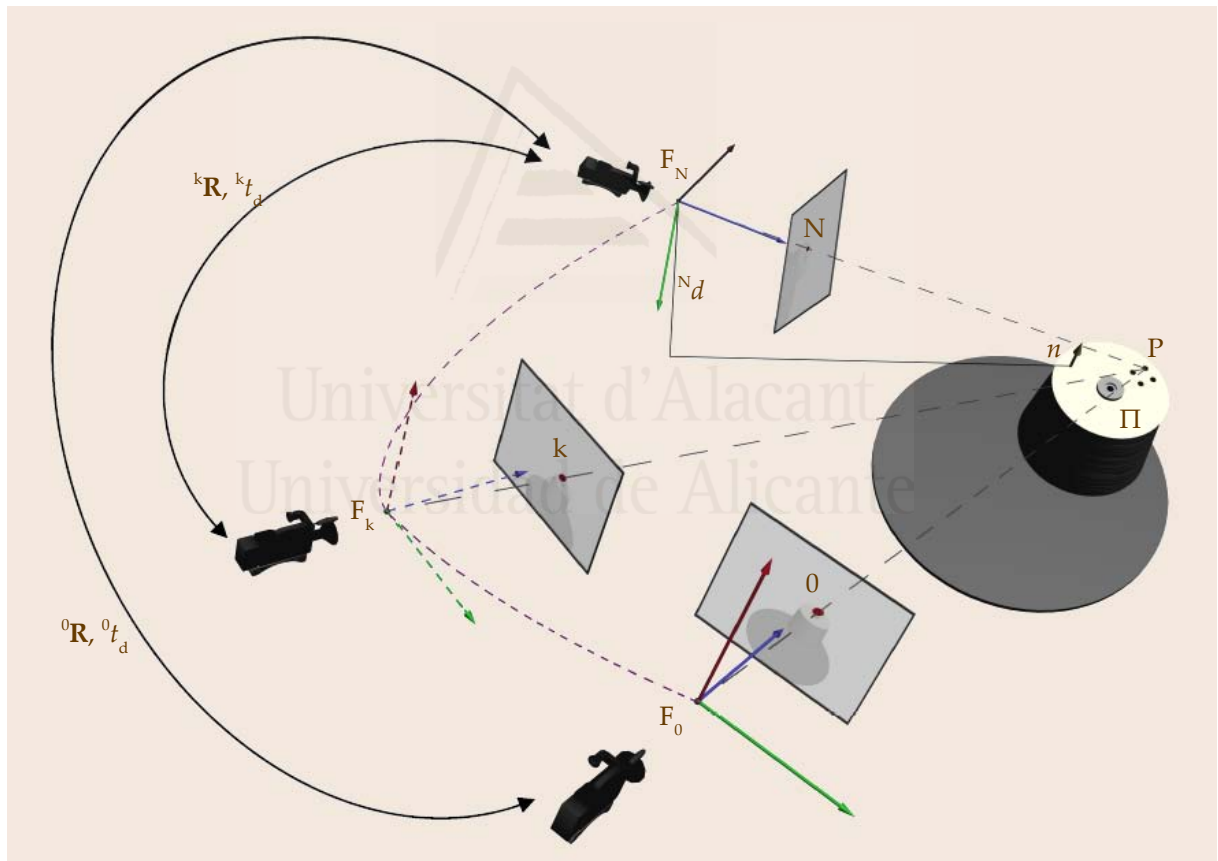


Fig. 6-8 Esquema de la reconstrucción del movimiento

La matriz  ${}^k \mathbf{R}$  denota la rotación entre una posición intermedia en la trayectoria y la final, mientras que  ${}^k t_d$  es la traslación escalada de la cámara entre las dos posiciones:

$${}^k t_d = \frac{{}^k t}{N_d} \quad (6.6)$$



donde  ${}^N d$  es la distancia desde  $\Pi$  al origen del sistema de referencia de la cámara situado en la posición final de la trayectoria.

La homografía  ${}^k \mathbf{G}$  se define como:

$${}^k \mu_i {}^k \mathbf{f}_i = {}^k \mathbf{G}^N \mathbf{f}_i + \beta_i {}^k e, \quad (6.7)$$

donde  ${}^k \mu$  es un factor de escala,  ${}^k e = \mathbf{A} {}^k \mathbf{R}^k t_d$  es la proyección en la imagen capturada por la cámara en el instante  $k$  del centro óptico cuando la cámara está en la posición final,  $\beta_i$  es un factor de escala constante que depende de la distancia  ${}^N d$ :

$$\beta_i = \frac{d(P_i, \Pi)}{{}^N d}, \quad (6.8)$$

donde  $d(P_i, \Pi)$  es la distancia desde el plano de la superficie de contacto hasta el punto 3-D, y  $\mathbf{A}$  es la matriz de parámetros intrínsecos, que se construye a partir de los parámetros intrínsecos,  $\xi$ , definidos en el Apartado 2.2.2:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} f \cdot p_u & -f \cdot p_u \cdot \cot(\theta) & u_0 \\ 0 & f \cdot p_v / \text{sen}(\theta) & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (6.9)$$

donde se recuerda que  $u_0$  y  $v_0$  son las coordenadas en píxeles del punto principal,  $f$  es la longitud focal,  $s_x$  y  $s_y$  son los factores de escalado de los píxeles respectivamente en las direcciones  $u$  y  $v$ , y  $\theta$  es el ángulo entre estos ejes.

Aunque  $\beta_i$  es desconocido, aplicando (6.7) entre la posición inicial de la cámara (la obtenida cuando se detecta la colisión y que se indica en adelante con el superíndice 0) y la posición final de la cámara (indicada con el superíndice N) se obtiene que:

$$\beta_i = \text{sign} \left( \frac{\left( {}^0 \mu_i {}^0 \mathbf{f}_i - {}^0 \mathbf{G}^N \mathbf{f}_i \right)_1}{\left( \mathbf{A} {}^0 \mathbf{R}^0 t_d \right)_1} \right) \frac{\| {}^0 \mathbf{G}^N \mathbf{f}_i \wedge {}^0 \mathbf{f}_i \|}{\| \mathbf{A} {}^0 \mathbf{R}^0 t_d \wedge {}^0 \mathbf{f}_i \|}, \quad (6.10)$$

donde el subíndice 1 indica el primer elemento del vector y  $\mathbf{A}$  se calcula durante el seguimiento intemporal de trayectorias en la imagen basado en control visual virtual cuando se utiliza la calibración multi-imagen definida en el Capítulo 4.

Remplazando (6.10) en (6.7) se obtienen las coordenadas en la imagen de las características simplemente dividiendo  ${}^k \mu_i {}^k \mathbf{f}_i$  por su última componente (de esta forma se obtienen las coordenadas homogéneas de  ${}^k \mathbf{f}_i$ ). Así, en el instante  $k$  se pueden calcular las coordenadas en píxeles de una característica a partir de la Ecuación:

$${}^k \mu_i {}^k \mathbf{f}_i = {}^k \mathbf{G}^N \mathbf{f}_i + \text{sign} \left( \frac{\left( {}^0 \mu_i {}^0 \mathbf{f}_i - {}^0 \mathbf{G}^N \mathbf{f}_i \right)_1}{\left( \mathbf{A} {}^0 \mathbf{R}^0 t_d \right)_1} \right) \frac{\| {}^0 \mathbf{G}^N \mathbf{f}_i \wedge {}^0 \mathbf{f}_i \|}{\| \mathbf{A} {}^0 \mathbf{R}^0 t_d \wedge {}^0 \mathbf{f}_i \|} \mathbf{A} {}^k \mathbf{R}^k t_d. \quad (6.11)$$

Como se puede ver en la Ecuación (6.11), para calcular  ${}^k f_i$  se deben obtener las matrices de homografía  ${}^0 G$  y  ${}^k G$ , al mismo tiempo que la rotación  ${}^0 R$  y la traslación escalada  ${}^0 t_d$ .

Si  $P_i$  está en la superficie de contacto,  $\beta_i$  es nulo. Por lo tanto, aplicando (6.7) entre las posiciones inicial y final en la trayectoria se tiene:

$${}^0 \mu_i {}^0 f_i = {}^0 G^N f_i. \quad (6.12)$$

La matriz de homografía que relaciona las posiciones inicial y final  ${}^0 G$  puede obtenerse a partir de la expresión (6.12) si se tienen al menos cuatro puntos situados en el plano de la superficie de contacto [Hartley-2003]. Para obtener  ${}^0 R$  and  ${}^0 t_d$  se introduce el concepto de matriz de homografía Euclídea  $H$ .

A partir de la homografía proyectiva  $G$  se puede obtener la homografía Euclídea  $H$  como sigue:

$$H = A^{-1} G A. \quad (6.13)$$

A partir de  $H$  es posible determinar el movimiento de la cámara aplicando el algoritmo propuesto en [ZhangZ-1996]. Por lo que aplicando este algoritmo entre las posiciones inicial y final se pueden calcular  ${}^0 R$  y  ${}^0 t_d$ .

De esta forma se han obtenido  ${}^0 G$ ,  ${}^0 R$  y  ${}^0 t_d$ . Ahora, se necesita calcular  ${}^k G$  con el objetivo de obtener la posición de las características en el plano imagen de acuerdo a la trayectoria planificada. Para conseguirlo, se debe obtener previamente la matriz de homografía Euclídea  ${}^k H$ . Posteriormente, es sencillo obtener  ${}^k G$  a partir de la Ecuación (6.13):

$${}^k G = A {}^k H A^{-1}. \quad (6.14)$$

$H$  se puede descomponer en una matriz de rotación y una de rango 1:

$$H = R - R t_d n. \quad (6.15)$$

Aplicando la Ecuación (6.15) se puede obtener  ${}^k H = {}^k R - {}^k R {}^k t_d n$  (en cualquier posición de la trayectoria planificada). Donde  ${}^k R$  y  ${}^k t_d$  se obtienen del planificador de trayectorias [Pomares-2005b] como se ha descrito previamente. Los diferentes pasos descritos en este apartado para la obtención de la nueva trayectoria se muestra en la Fig. 6-9.

Si el error inicial cometido en la estimación de la homografía Euclídea se propaga a lo largo de la trayectoria, el método descrito para modificar la trayectoria en la imagen no depende de los errores cometidos en la estimación de los parámetros intrínsecos de la cámara. Para probarlo, se calcula la estimación inicial de la matriz de homografía Euclídea,  ${}^0 \hat{H}$ , aplicando la Ecuación (6.13) de la siguiente manera:

$${}^0 \hat{H} = \hat{A}^{-1} {}^0 G \hat{A}. \quad (6.16)$$

Substituyendo el valor de  ${}^0G$  obtenido de la Ecuación (6.14) la estimación de la matriz de homografía Euclídea  ${}^0\hat{H}$  se puede calcular a partir de la estimación de los parámetros intrínsecos  $\hat{A}$ , los parámetros intrínsecos reales  $A$ , y de la matriz de homografía Euclídea inicial real  $H$ :

$${}^0\hat{H} = \hat{A}^{-1} A {}^0H A^{-1} \hat{A}. \tag{6.17}$$

La premisa inicialmente mencionada que indicaba que el error inicial de la estimación de la homografía Euclídea se propague a través de la trayectoria se puede expresar en una iteración dada  $k$  como:

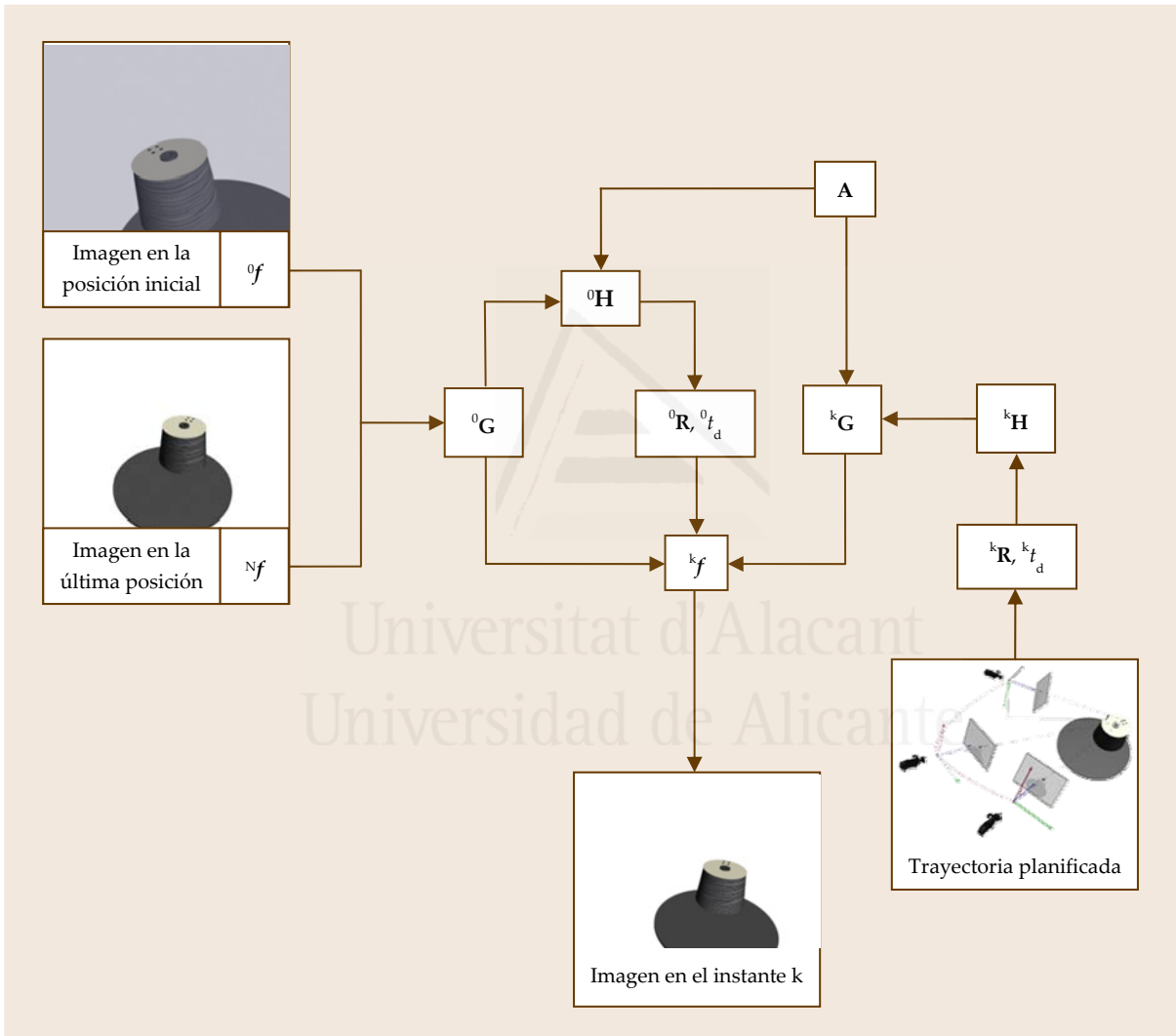


Fig. 6-9 Esquema de la reconstrucción de la trayectoria en la imagen

$${}^k\hat{H} = E_A {}^kH E_A^{-1}, \tag{6.18}$$

donde  $E_A {}^kH E_A^{-1}$

De acuerdo con la Ecuación (6.11) las coordenadas en píxeles de las características son:

$${}^k\hat{\mu}_i {}^k\hat{f}_i = \hat{\mathbf{A}} {}^k\hat{\mathbf{H}}\hat{\mathbf{A}}^{-1N} f_i + \text{sign} \left( \frac{\left( \begin{smallmatrix} 0 \\ \mu_i \end{smallmatrix} \begin{smallmatrix} 0 \\ f_i \end{smallmatrix} - \begin{smallmatrix} 0 \\ \mathbf{G}^N \end{smallmatrix} f_i \right)_1}{\left( \hat{\mathbf{A}}^0 \hat{\mathbf{T}} \right)_1} \right) \frac{\| \begin{smallmatrix} 0 \\ \mathbf{G}^N \end{smallmatrix} f_i \wedge \begin{smallmatrix} 0 \\ f_i \end{smallmatrix} \|}{\| \hat{\mathbf{A}}^0 \hat{\mathbf{T}} \wedge \begin{smallmatrix} 0 \\ f_i \end{smallmatrix} \|} \hat{\mathbf{A}} {}^k\hat{\mathbf{T}}, \quad (6.19)$$

donde el vector estimado  ${}^k\hat{\mathbf{T}}$  es:

$${}^k\hat{\mathbf{T}} = \left\| n \left( \hat{\mathbf{A}}^{-1} \mathbf{A} \right)^{-1} \right\| \hat{\mathbf{A}}^{-1} \mathbf{A} {}^k\mathbf{R}^T {}^k t_d. \quad (6.20)$$

Como se demuestra en [Mezouar-2002b] el segundo término de la suma de la Ecuación (6.19) es igual al segundo término de la suma de la Ecuación (6.11). Aplicando (6.18) en el primer término de la suma de (6.19) se obtiene:

$$\hat{\mathbf{A}} {}^k\hat{\mathbf{H}}\hat{\mathbf{A}}^{-1N} f_i = \hat{\mathbf{A}} \mathbf{E}_A {}^k\mathbf{H} \mathbf{E}_A^{-1} \hat{\mathbf{A}}^{-1N} f_i = \mathbf{A} {}^k\mathbf{H} \mathbf{A}^{-1N} f_i. \quad (6.21)$$

Considerando (6.14) se obtiene  ${}^k\mathbf{G}f_i$ , que es justo el primer término de la suma de (6.11). De esta forma se demuestra que:

$${}^k\hat{\mu}_i {}^k\hat{f}_i = {}^k\mu_i {}^k f_i. \quad (6.22)$$

Por lo tanto el sistema propuesto no se ve afectado por los errores cometidos en la estimación de los parámetros intrínsecos.

### 6.2.2.2 Matriz de interacción Fuerza-Imagen

La necesidad de realizar una calibración previa se hace patente en sistemas de control visual-fuerza. En este tipo de sistemas de control, el robot realiza simultáneamente una tarea de control visual y control de la interacción con el entorno. En tareas de control visual y fuerza aparecen parámetros desconocidos a priori tales como rozamientos, relaciones entre sistemas de coordenadas de los sensores, características de la superficie de contacto, etc.

En este apartado se propone un sistema que realiza una modificación de la trayectoria en la imagen seguida por el sistema de control visual en base a la información procedente del sensor de fuerza [GarciaGJ-2007a]. Para ello se ha definido el concepto de matriz de interacción fuerza-imagen que determina la relación entre variaciones en la imagen y variaciones en las fuerzas de interacción. El método propuesto es capaz de realizar una estimación on-line de dicha matriz sin necesidad de disponer de conocimiento previo de los parámetros anteriormente mencionados. El método realiza una estimación en base a la información obtenida de ambos sensores. En concreto, el sistema empleado para la estimación se basa en el método recursivo Gauss-Newton y usa una optimización no lineal de mínimos cuadrados. Este algoritmo se basa en trabajos previos como [Hosoda-1994, Jagersand-1997, Piepmeier-2003] dirigidos al desarrollo de un método de Gauss-Newton dinámico de control visual para el seguimiento de objetos en movimiento. En concreto, estos métodos se encargan de realizar una estimación robusta del Jacobiano de la imagen que relaciona las características visuales con la variación en las coordenadas articulares del sistema.

A continuación se describe el significado de la matriz de interacción fuerza-imagen,  $\mathbf{L}_{FV}$ , que se pretende estimar. Para ello, considerando  $\mathbf{F}$  las fuerzas de interac-

ción obtenidas respecto al extremo del robot y  $\mathbf{r}$  la localización del objeto, se define la matriz de interacción para las fuerzas,  $\mathbf{L}_F$ , de la siguiente manera:

$$\mathbf{L}_F = \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{r}}. \quad (6.23)$$

De esta forma, la pseudo inversa de la matriz de interacción para las fuerzas permite obtener las variaciones de la posición y orientación del punto de contacto en relación a las variaciones de las fuerzas y momentos ejercidos:

$$\mathbf{L}_F^+ = \left( \mathbf{L}_F^T \mathbf{L}_F \right)^{-1} \mathbf{L}_F^T = \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \mathbf{F}}. \quad (6.24)$$

La matriz de interacción de la imagen (definida en la Ecuación (2.2)) relaciona variaciones en las características visuales con la variación de la posición de la cámara en el espacio Cartesiano 3-D.

$$\dot{\mathbf{s}} = \mathbf{L}_s \cdot \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \mathbf{t}}. \quad (6.25)$$

Derivando esta ecuación y aplicando (6.24) se tiene que:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{s}} &= \mathbf{L}_s \cdot \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \mathbf{F}} \cdot \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{t}}, \\ \dot{\mathbf{s}} &= \mathbf{L}_s \cdot \mathbf{L}_F^+ \cdot \dot{\mathbf{F}} \rightarrow \dot{\mathbf{s}} = \mathbf{L}_{FI} \cdot \dot{\mathbf{F}}. \end{aligned} \quad (6.26)$$

siendo  $\mathbf{L}_{FI}$  la matriz de interacción que se desea estimar empleando mínimos cuadrados ponderados.

En una aplicación en la que sea necesario mantener una fuerza constante con el entorno, la trayectoria en imagen se debe modificar dependiendo de las fuerzas de interacción. Para ello, usando la matriz  $\mathbf{L}_{FI}$ , las nuevas características deseadas (empleadas por el sistema de seguimiento intemporal de trayectorias basado en control visual virtual descrito en el Capítulo 3) durante el contacto serán:

$${}^j \mathbf{s}' = {}^j \mathbf{s} + \mathbf{L}_{FI} \cdot (\mathbf{F} - \mathbf{F}_d). \quad (6.27)$$

El valor del conjunto de características  ${}^j \mathbf{s}$ , se obtiene a partir del método de seguimiento descrito en el Apartado 3.5.

A continuación se describe el método empleado para la estimación de la matriz de interacción  $\mathbf{L}_{FI}$ . Considerando un sistema MIMO en el que las entradas son variaciones en las fuerzas de interacción y salidas variaciones en las características visuales, la ecuación de medida puede representarse de la siguiente manera:

$$\Delta \mathbf{s} = \mathbf{L}_{FI} \cdot \Delta \mathbf{F} + \mathbf{e}, \quad (6.28)$$

donde:

- $\Delta \mathbf{s} = (\Delta \mathbf{s}_1 \quad \dots \quad \Delta \mathbf{s}_m)^T$  son las salidas del sistema, es decir, la variación en las características visuales.

- $\Delta\mathbf{F} = (\Delta F_1 \dots \Delta F_n)^T$  son las entradas al sistema, es decir, la variación en las fuerzas de interacción.
- $\mathbf{e}$  es un vector de error de medida (ruido blanco).
- $\mathbf{L}_{FI}$  es la matriz de interacción fuerza-imagen anteriormente definida cuyo valor estimado se va a representar por  $\hat{\mathbf{L}}_{FI}$  (por simplicidad en la notación a partir de ahora se representa  $\mathbf{L} = \mathbf{L}_{FI}$ ):

$$\mathbf{L} = \begin{pmatrix} \mathbf{L}_{11} & \dots & \mathbf{L}_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ \mathbf{L}_{m1} & \dots & \mathbf{L}_{mn} \end{pmatrix}, \quad (6.29)$$

$$\hat{\mathbf{L}}_j = (\hat{\mathbf{L}}_{j1} \dots \hat{\mathbf{L}}_{jn}), j=1\dots m.$$

Por lo tanto, el valor para cada una de las  $m$  salidas o características visuales será:

$$\Delta s_j = \hat{\mathbf{L}}_j^T \cdot \Delta\mathbf{F} + \mathbf{e}_j. \quad (6.30)$$

Despejando el error en la expresión (6.30) y considerando  $k$  medidas se obtiene la siguiente ecuación para el error ponderado exponencialmente:

$$\begin{pmatrix} \lambda^{(k-1)/2} \mathbf{e}_j(1) \\ \lambda^{(k-2)/2} \mathbf{e}_j(2) \\ \vdots \\ \mathbf{e}_j(k) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda^{(k-1)/2} \Delta s_j(1) \\ \lambda^{(k-2)/2} \Delta s_j(2) \\ \vdots \\ \Delta s_j(k) \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \lambda^{(k-1)/2} (\Delta\mathbf{F}(1))^T \\ \lambda^{(k-2)/2} (\Delta\mathbf{F}(2))^T \\ \vdots \\ (\Delta\mathbf{F}(k))^T \end{pmatrix} \cdot \hat{\mathbf{L}}_j. \quad (6.31)$$

Donde el parámetro  $\lambda \in [0,1]$  indica el peso de las nuevas medidas frente a estimaciones anteriores. Cuanto mayor es el valor de  $\lambda$  más peso se le asigna a las nuevas medidas. La ecuación (6.31) también puede representarse de la siguiente manera:

$$\bar{\mathbf{e}}_{jk} = \bar{\mathbf{S}}_{jk} - \bar{\mathbf{F}}_k \cdot \hat{\mathbf{L}}_j. \quad (6.32)$$

Con el objetivo de estimar la matriz de interacción fuerza-imagen se define la siguiente función objetivo a minimizar:

$$E_k = \sum_{j=1}^m \bar{\mathbf{e}}_{jk}^T \bar{\mathbf{e}}_{jk} = \sum_{j=1}^m (\bar{\mathbf{S}}_{jk} - \bar{\mathbf{F}}_k \cdot \hat{\mathbf{L}}_j)^T (\bar{\mathbf{S}}_{jk} - \bar{\mathbf{F}}_k \cdot \hat{\mathbf{L}}_j). \quad (6.33)$$

La estimación de la matriz de interacción fuerza-imagen puede representarse de la siguiente manera:

$$\hat{\mathbf{L}} = (\hat{\mathbf{L}}_1^T \dots \hat{\mathbf{L}}_m^T)^T. \quad (6.34)$$

El valor de  $\hat{\mathbf{L}}_j(k+1)$  puede ser deducido recursivamente a partir de la medida  $(k+1)$  y el valor de  $\hat{\mathbf{L}}_j(k)$ . Para  $(k+1)$  medidas el error ponderado exponencialmente será el siguiente:



$$\begin{pmatrix} \sqrt{\lambda} \bar{\mathbf{e}}_{jk} \\ \mathbf{e}_j(k+1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{\lambda} \bar{\mathbf{S}}_{jk} \\ \Delta \mathbf{s}_j(k+1) \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \sqrt{\lambda} \bar{\mathbf{F}}_k \\ (\Delta \mathbf{F}(k))^T \end{pmatrix} \cdot \hat{\mathbf{L}}_j. \quad (6.35)$$

Además, la siguiente condición deberá cumplirse si se desea reducir en la iteración  $k+1$  completamente el error representado en la Ecuación (6.33):

$$\hat{\mathbf{L}}_j(k+1) = (\bar{\mathbf{F}}_{k+1}^T \bar{\mathbf{F}}_{k+1})^{-1} \bar{\mathbf{F}}_{k+1}^T \bar{\mathbf{S}}_{jk+1}. \quad (6.36)$$

Supóngase ahora que:

$$\mathbf{P}(k) = (\bar{\mathbf{F}}_k^T \bar{\mathbf{F}}_k)^{-1}. \quad (6.37)$$

Por lo tanto:

$$\mathbf{P}(k+1) = (\bar{\mathbf{F}}_{k+1}^T \bar{\mathbf{F}}_{k+1})^{-1} = \left[ \begin{pmatrix} \sqrt{\lambda} \bar{\mathbf{F}}_k^T & \Delta \mathbf{F}(k+1) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sqrt{\lambda} \bar{\mathbf{F}}_k \\ (\Delta \mathbf{F}(k+1))^T \end{pmatrix} \right]^{-1}. \quad (6.38)$$

Multiplicando los términos de la Ecuación (6.38) se obtiene:

$$\begin{aligned} \mathbf{P}(k+1) &= \left[ \lambda \bar{\mathbf{F}}_k^T \bar{\mathbf{F}}_k + \Delta \mathbf{F}(k+1) (\Delta \mathbf{F}(k+1))^T \right]^{-1}, \\ \mathbf{P}(k+1) &= \frac{1}{\lambda} \left[ \mathbf{P}^{-1}(k) + \Delta \mathbf{F}(k+1) \lambda^{-1} (\Delta \mathbf{F}(k+1))^T \right]^{-1}. \end{aligned} \quad (6.39)$$

Finalmente, desarrollando esta expresión:

$$\mathbf{P}(k+1) = \frac{1}{\lambda} \left[ \begin{aligned} &\mathbf{P}(k) - \mathbf{P}(k) \Delta \mathbf{F}(k+1) \cdot \\ &\cdot \left[ \lambda + (\Delta \mathbf{F}(k+1))^T \mathbf{P}(k) \Delta \mathbf{F}(k+1) \right]^{-1} \cdot (\Delta \mathbf{F}(k+1))^T \mathbf{P}(k) \end{aligned} \right]. \quad (6.40)$$

Con el objetivo de obtener una representación más compacta de la expresión anterior se define:

$$\mathbf{K}(k+1) = \mathbf{P}(k) \Delta \mathbf{F}(k+1) \cdot \left[ \lambda + (\Delta \mathbf{F}(k+1))^T \mathbf{P}(k) \Delta \mathbf{F}(k+1) \right]^{-1}. \quad (6.41)$$

Con lo que sustituyendo (6.41) en (6.40) se llega a:

$$\mathbf{P}(k+1) = \frac{1}{\lambda} \left[ \mathbf{P}(k) - \mathbf{K}(k+1) (\Delta \mathbf{F}(k+1))^T \mathbf{P}(k) \right]. \quad (6.42)$$

Por otro lado, a partir de la Ecuación (6.36) se puede deducir que:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{L}}_j(k+1) &= \mathbf{P}(k+1) \begin{bmatrix} \sqrt{\lambda} \bar{\mathbf{F}}_k^T & \Delta \mathbf{F}(k+1) \\ \Delta \mathbf{s}_j(k+1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sqrt{\lambda} \bar{\mathbf{S}}_{jk} \\ \Delta \mathbf{s}_j(k+1) \end{bmatrix}, \\ \hat{\mathbf{L}}_j(k+1) &= \mathbf{P}(k+1) \left[ \lambda \bar{\mathbf{F}}_k^T \bar{\mathbf{S}}_{jk} + \Delta \mathbf{F}(k+1) \Delta \mathbf{s}_j(k+1) \right]. \end{aligned} \quad (6.43)$$

Sustituyendo (6.42) en (6.43):

$$\hat{\mathbf{L}}_j(k+1) = \hat{\mathbf{L}}_j(k) + \mathbf{K}(k+1) \cdot \left[ \Delta \mathbf{s}_j(k+1) - (\Delta \mathbf{F}(k+1))^T \hat{\mathbf{L}}_j(k) \right]. \quad (6.44)$$

A partir de (6.44) se puede obtener:

$$\hat{\mathbf{L}}_j^T(k+1) = \hat{\mathbf{L}}_j^T(k) + [\Delta \mathbf{s}_j(k+1) - \hat{\mathbf{L}}_j^T(k) \Delta \mathbf{F}(k+1)] \mathbf{K}^T(k+1). \quad (6.45)$$

Agrupando las estimaciones de las  $m$  filas de la matriz de interacción se obtiene finalmente:

$$\hat{\mathbf{L}}^T(k+1) = \hat{\mathbf{L}}^T(k) + [\Delta \mathbf{s}(k+1) - \hat{\mathbf{L}}^T(k) \Delta \mathbf{F}(k+1)] \mathbf{K}^T(k+1). \quad (6.46)$$

donde el valor de la matriz  $\mathbf{K}$  se corresponde con la expresión obtenida en (6.41). Finalmente, usando la Ecuación (6.46) de manera recursiva, se obtiene una estimación de la matriz de interacción fuerza-imagen.

Para resumir los diferentes pasos que se requieren para determinar el valor de la matriz de interacción fuerza-imagen, se puede seguir el algoritmo que se muestra en la Fig. 6-10.

```

 $\Delta \mathbf{s} : \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}^m ; \Delta \mathbf{F}_0, \Delta \mathbf{F}_1 \in \mathfrak{R}^n ; \hat{\mathbf{L}}(0) \in \mathfrak{R}^{m \times n} ; \hat{\mathbf{P}}(0) \in \mathfrak{R}^{n \times n} ; \lambda \in (0, 1)$ 
For  $k=0, 1, \dots$  do
   $\Delta \mathbf{s}(k+1) = \mathbf{s}_{k+1} - \mathbf{s}_k ;$ 
   $\Delta \mathbf{F}(k+1) = \mathbf{F}_{k+1} - \mathbf{F}_k ;$ 
   $\hat{\mathbf{L}}(k+1) = \hat{\mathbf{L}}(k) + [\Delta \mathbf{s}(k+1) - \hat{\mathbf{L}}(k) \Delta \mathbf{F}(k+1)] \mathbf{K}^T(k+1) ;$ 
   $\mathbf{K}(k+1) = \mathbf{P}(k) \Delta \mathbf{F}(k+1) \cdot [\lambda + (\Delta \mathbf{F}(k+1))^T \mathbf{P}(k) \Delta \mathbf{F}(k+1)]^{-1} ;$ 
   $\mathbf{P}(k+1) = \frac{1}{\lambda} [\mathbf{P}(k) - \mathbf{K}(k+1) (\Delta \mathbf{F}(k+1))^T \mathbf{P}(k)] ;$ 
end

```

Fig. 6-10 Algoritmo de estimación de la matriz de interacción fuerza-imagen

## 6.2.3 Detección de un cambio en la superficie

### 6.2.3.1 Detección de discontinuidad de superficies a partir de las fuerzas de interacción

Para asegurar que una tarea determinada en la que se requiere una interacción con el espacio de trabajo se desarrolla correctamente, el sistema debe llevar a cabo una variación en la trayectoria en la imagen, dependiendo de las restricciones espaciales impuestas por las fuerzas de interacción. En el apartado anterior se describió un método que permite obtener esa variación de la trayectoria en la imagen para poder seguir con la tarea a pesar de las interacciones con el entorno.

En anteriores trabajos [Pomares-2005b] se ha propuesto un método para detectar discontinuidades en la superficie de interacción basado en el GLR (“Generalized Likelihood Ratio”) [Willsky-1976]. Previamente, el GLR se ha aplicado en otros entornos como la estimación de movimiento 2-D en una secuencia de imágenes [Faugueras-1998] y la detección de discontinuidades en curvaturas de carretera [Behringer-1995].

Para reducir el nivel de ruido en las fuerzas de interacción obtenidas cuando el robot está siguiendo una superficie, dichas fuerzas se filtran usando un filtro de Kalman (ver detalles en [Pomares-2005b]). Una vez definida la función de prueba,  $l(k; \theta)$ , se establece el umbral  $U$  de forma que si  $l(k; \theta_m) > U$ , entonces se ha producido un cambio en la superficie (empíricamente, este umbral se ha establecido en 1000).

En la Fig. 6-11 se muestran los valores de la fuerza  $f_z$  y del parámetro  $l(k; \theta_m)$  obtenido durante el seguimiento de dos superficies diferentes (se ha empleado la configuración mostrada en la Fig. 6-12). Se puede observar que usando el umbral previamente definido, el sistema puede detectar automáticamente el cambio en la superficie. Sin embargo, este método no es lo suficientemente robusto para detectar el punto exacto en el que se tiene la discontinuidad en la superficie. Por ejemplo, en la Fig. 6-11.(b) hay varios momentos en los que se detecta la discontinuidad (es decir  $l(k; \theta)$  es mayor que 1000). Como muestra la Fig. 6-11.(b), se pueden obtener falsas detecciones cuando exis-

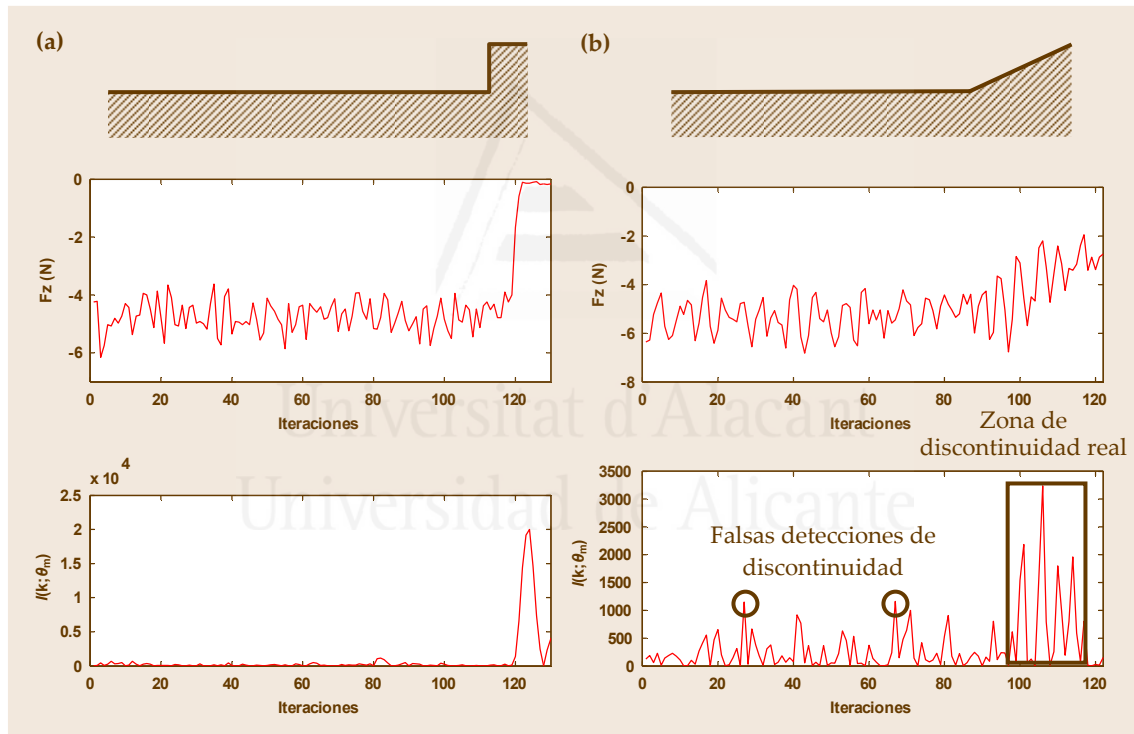


Fig. 6-11 Forma de la superficie, evolución de  $f_z$  y parámetro  $l(k; \theta_m)$  (a) Seguimiento de una superficie con un salto (b) Seguimiento de una superficie con un cambio suave

ten grandes rozamientos. Además, estas detecciones falsas pueden aparecer en otras situaciones debido al alto nivel de ruido en la señal obtenida del sensor de fuerza. Por lo tanto, se concluye que este método es adecuado para obtener un valor acerca de la probabilidad de una discontinuidad en una superficie. Sin embargo, para mejorar la robustez en la detección se debe emplear información adicional. En la siguiente sección se muestra un método basado en luz estructurada que, combinado con el propuesto hasta ahora, permite obtener un método robusto para la detección de discontinuidades en las superficies de contacto.

### 6.2.3.2 Luz estructurada para la detección de zonas de discontinuidades en el espacio imagen

En [Gil-2006] se describe una técnica para estimar zonas de discontinuidad en una superficie determinada en el espacio imagen. Esta aproximación está basada en el uso de patrones de luz estructurada que son proyectados en las superficies de los objetos de la escena. La proyección del haz de luz sobre las distintas superficies determina ciertas discontinuidades debido al cambio de dirección de los planos de proyección. Las características 3-D del objeto, como los valores de profundidad y las orientaciones de la superficie producen una función diferente de distribución de la reflexión y, de esta forma, distintos planos de proyección. El sistema empleado para el proceso de detección (ver Fig. 6-12) se compone de una cámara CCD, un láser LASIRIS SNF con un ancho de onda de 660nm, una potencia de 20mW, un ángulo de aproximadamente  $15^\circ$  y 7 círculos concéntricos con un ángulo entre haz de  $0.77^\circ$ . Este láser está localizado cerca de la cámara en el extremo del robot. De esta forma, el sistema de cámara-láser escanea la escena en cada una de las trayectorias ejecutadas por el robot.

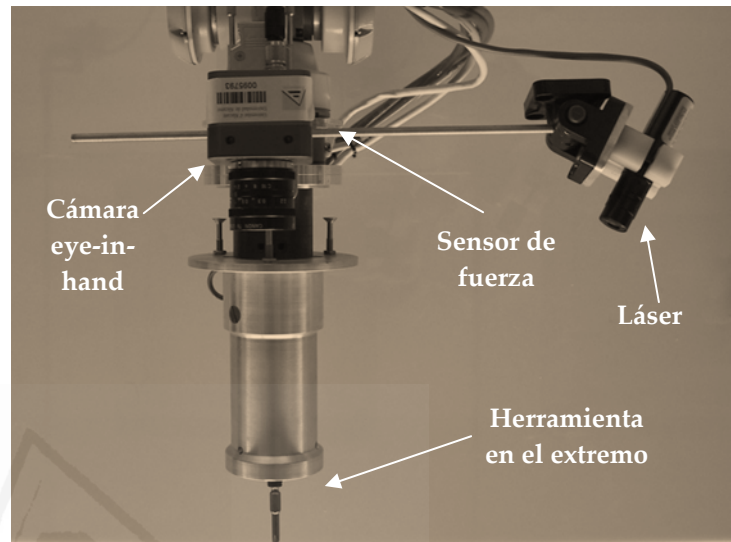


Fig. 6-12 Arquitectura del sistema para la experimentación

Cuando más de un haz de luz golpea diferentes superficies, es decir, superficies con diferentes orientaciones o distinto valor de profundidad de un mismo objeto (o superficies u objetos distintos), se observa un efecto de discontinuidad en los planos de proyección (ver Fig. 6-13). La discontinuidad es causada por la rotura de la proyección del haz de luz; así, se pueden observar varios planos de proyección desplazados en el espacio. El patrón empleado consiste en círculos concéntricos. Este método proporciona una línea donde se tiene una discontinuidad en la superficie. Este proceso se detalla en [Pomares-2006c, Pomares-2008].



Fig. 6-13 Proyección de láser sobre una superficie escalonada

### 6.2.3.3 Luz estructurada y fuerzas de interacción para la detección conjunta de cambios en las superficies

Hasta el momento se han mostrado dos técnicas para la detección de cambios en una superficie. Sin embargo, ambos métodos independientemente no son lo suficientemente robustos para detectar con gran precisión el momento en el que la superficie cambia. El primer método se basa en la información de fuerza para detectar el momento en el que hay un cambio en la superficie. El principal problema que presenta este método es el error en las medidas del sensor de fuerza. Como se ha mostrado en la Fig. 6-11 las oscilaciones en las medidas de fuerzas introducen falsas detecciones de cam-

bios en la superficie. El segundo método descrito en el Apartado 6.2.3.2, utiliza la información visual para detectar los cambios en la superficie. El problema que presenta este método es que no utiliza la información de las fuerzas de contacto, que permiten obtener información local de la interacción que las cámaras no pueden medir. Para impedir la limitación de ambos métodos se va a describir a continuación el uso de los dos sensores conjuntamente. Para conseguirlo, la luz estructurada se usa con el fin de determinar las zonas de discontinuidad en las que el método descrito en el Apartado 6.2.3.1 se aplica. De esta forma, no se obtienen las falsas detecciones.

Cuando el sistema descrito en el apartado 6.2.3.2 basado en luz estructurada determina una zona de discontinuidad, se obtiene una línea en el espacio imagen que

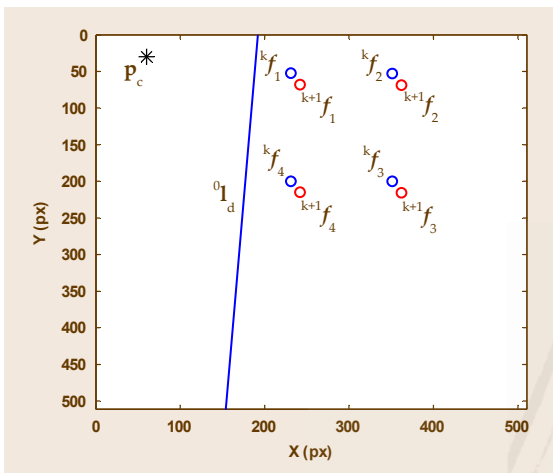


Fig. 6-14 Características extraídas en la imagen y línea de discontinuidad  ${}^0l_d$

representa esta discontinuidad  ${}^0l_d$ . Como muestra la Fig. 6-14, a partir de la información visual es posible determinar no sólo las características visuales empleadas por el sistema de control visual, sino también el punto,  $p_c$ , en el que la herramienta situada en el extremo del robot colisiona con la superficie. En consecuencia, el algoritmo descrito en el apartado 6.2.3.1 se activará en el momento en el que  $p_c$  llegue a la línea de discontinuidad  ${}^0l_d$ , evitando de esta forma las falsas detecciones. La estimación de la iteración en la que el punto  $p_c$  esta cerca de la línea recta  ${}^0l_d$  es el objeto del presente apartado.

Una vez que se detecta la línea  ${}^0l_d$ , su posición en futuras iteraciones se estima utilizando la información sobre la posición de las características en la imagen que emplea el sistema de control visual. En una determinada iteración, se conocen la posición actual de las características  ${}^k s$  y las deseadas  ${}^{k+1} s$ , obtenidas a partir del método de seguimiento intemporal de trayectorias basado en control visual virtual descrito en el Capítulo 3 y mejorado en el Capítulo 4 con la calibración multi-imagen. Usando esta información se puede calcular la matriz de homografía que relaciona estas dos posiciones  $G_k$  tal y como se describe en [Hartley-2000]. La Fig. 6-14 muestra las posiciones actual y deseada de las características visuales en una determinada iteración de la tarea de control visual.

Una vez que se ha calculado la matriz de homografía, es posible obtener la rotación  $R_k$  y la traslación  $t_k$  que la cámara ha realizado a partir de  $G_k$ , aplicando el algoritmo mostrado en [ZhangZ-1996]. Cuando se ha obtenido la rotación y traslación de la cámara, se puede localizar en la siguiente iteración  $i$  la línea recta  ${}^i l_d$  dada por el algoritmo descrito en 6.2.3.2. Para conseguirlo, se toman dos puntos de la recta. Aplicando la siguiente ecuación se determina la posición de cada uno de estos puntos a partir del movimiento de la cámara mencionado anteriormente:

$$x_1 = R_k^{-1}(x_0 - t_k), \quad (6.47)$$

donde  $x_0$  y  $x_1$  indican las coordenadas del punto en la imagen en la iteración actual y los obtenidos después de aplicar el movimiento de la cámara respectivamente. Calculando el movimiento de los dos puntos, se puede reconstruir la posición de la línea virtual  ${}^i\mathbf{l}_d$  en el plano imagen.

El algoritmo calcula la posición de la línea recta  ${}^i\mathbf{l}_d$  en cada iteración de la tarea de control visual hasta que el extremo del robot,  $\mathbf{p}_r$  está cerca de esta línea. En este momento se emplea el algoritmo descrito en la Sección 6.2.3.1 para determinar con precisión el punto exacto de discontinuidad. En la Fig. 6-15 se puede ver la simulación del cálculo de la posición de la línea virtual  ${}^0\mathbf{l}_d$  durante la tarea de control visual. El extremo del robot,  $\mathbf{p}_r$  tiene una posición fija en el plano imagen (hay una distancia constante entre él y la cámara). La posición inicial se indica con  ${}^0\mathbf{l}_d$ . Las líneas representadas con  ${}^i\mathbf{l}_d$  son las sucesivas estimaciones obtenidas por el algoritmo descrito en este apartado. Finalmente, la línea representada por  ${}^i\mathbf{l}_d$  ilustra la obtenida en la iteración en la que el algoritmo detecta que la herramienta situada en el extremo del robot está suficientemente cerca de esta línea. En este punto, se activa el método descrito en el Apartado 6.2.3.1.

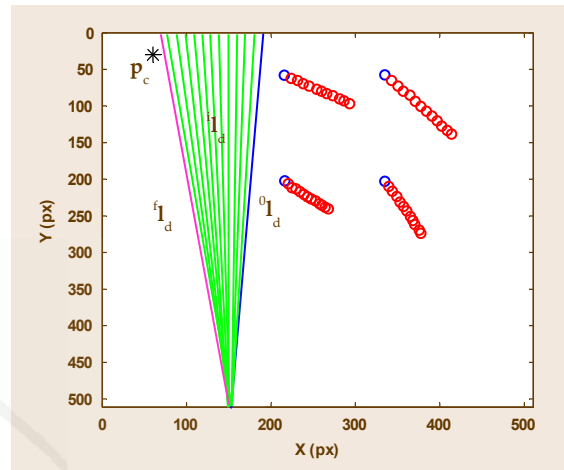


Fig. 6-15 Proyección de la discontinuidad durante la tarea de control visual

## 6.3 Resultados

### 6.3.1 Tareas de control visual manteniendo el contacto sobre una superficie

#### 6.3.1.1 Detección de cambios en la superficie

##### 6.3.1.1.1 Arquitectura del sistema

La arquitectura del sistema está compuesta de una cámara en configuración "eye-in-hand" PHOTONFOCUS MV-D752-160-CL-8 en el extremo de un robot de 7 grados de libertad Mitsubishi PA-10 (ver Fig. 6-12) también equipado con un sensor de fuerza (67M25A-I40 de JR3. Inc.) y un láser LASIRIS SNF con un ancho de onda de 660nm. Se usa una Coreco X64CL-Pro como tarjeta de adquisición y procesamiento de imágenes. La cámara es capaz de adquirir y procesar hasta 100 imágenes/segundo usando una resolución de imagen de 320x240. Al no estar interesados en tareas de proceso de imágenes en estos experimentos, la trayectoria en la imagen se genera usando un patrón con cuatro puntos que serán las características extraídas para realizar el control visual.



## 6.3.1.1.2 Detección utilizando sólo la información de fuerzas

En este apartado se presenta un experimento para seguir una superficie curvada que valide los algoritmos propuestos en el Apartado 6.2.3. En este caso, una vez que la discontinuidad se detecta y la nueva superficie se ha reconocido [Pomares-2005c], el robot se reorienta con respecto a esta nueva superficie. Aplicando el algoritmo para fusionar la información visual y de fuerza descrito en el apartado 6.2.1, se obtiene la

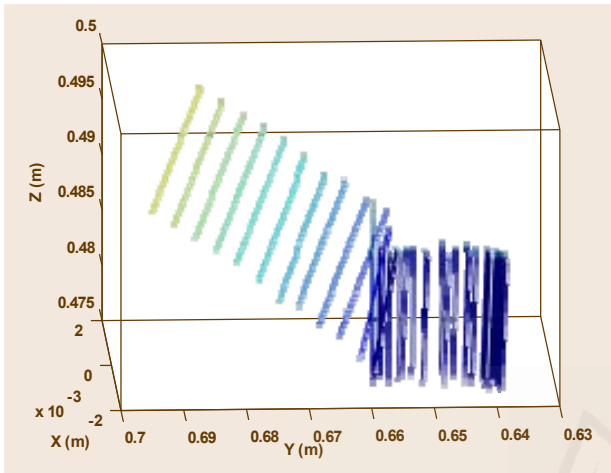


Fig. 6-16 Seguimiento de una superficie curva

trayectoria 3-D representada en la Fig. 6-16. Como se describe en el apartado 6.2.2.1, una vez que la nueva superficie se ha reconocido, la trayectoria en la imagen se modifica de forma que sea posible utilizar la información de imagen y de fuerza para controlar la tarea. En esta figura se puede observar que el robot permanece perpendicular con respecto a la superficie durante la trayectoria.

Para verificar que el sistema puede detectar el cambio en la superficie usando únicamente la información del sensor de fuerza, en la Fig. 6-17 se representan las

fuerzas de interacción obtenidas (en la dirección Z) y el valor de  $l(k;\theta)$ . Como se indicaba anteriormente, el umbral usado para la detección de los cambios en la superficie es 1000, de forma que el sistema es capaz de detectar el cambio.

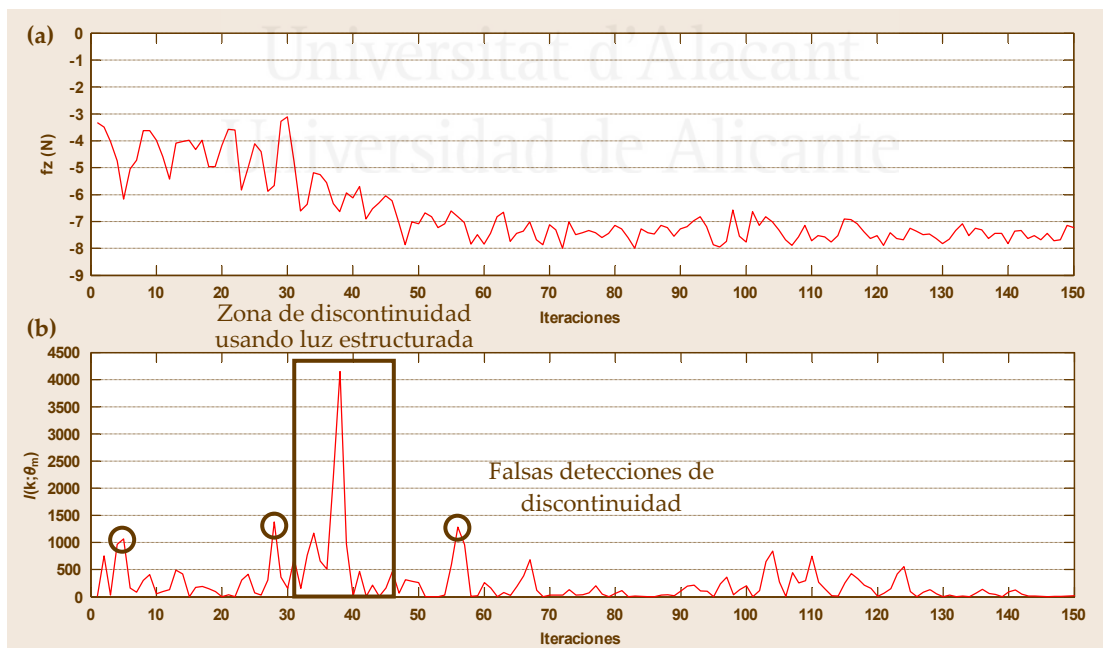


Fig. 6-17 Evolución de la fuerza  $f_z$  y  $l(k;\theta)$

Sin embargo, tal y como se ha mostrado en la sección 6.2.3.1 este método puede proporcionar falsas detecciones de discontinuidades (como se puede ver también en la

Fig. 6-17). En el siguiente apartado, se describe un nuevo experimento para mostrar cómo el uso de luz estructurada puede mejorar el comportamiento del sistema.

### 6.3.1.1.3 Mejora de la detección de cambios en la superficie usando el sistema multisensorial

#### 6.3.1.1.3.1 Experimento 1. Superficie convexa

A continuación, se describe un experimento en el que se generan más fricciones durante el seguimiento de la superficie. En este caso, la discontinuidad de la superficie se muestra en la Fig. 6-19. Las fuerzas de interacción y el parámetro  $l(k; \theta)$  obtenidos en el seguimiento de la superficie usando la técnica descrita en el apartado 6.2.3.1 se muestran en la Fig. 6-18. Se puede observar que el sistema es capaz de detectar la zona de discontinuidad, pero también aporta falsas detecciones. Para mejorar el comportamiento el siguiente paso es limitar las zonas donde la discontinuidad puede aparecer usando el método basado en luz estructurada descrito en la Sección 6.2.3.2. Usando este método, se obtiene la zona de discontinuidad representada por dos líneas rectas en la Fig. 6-20.(a). El último paso es determinar cuándo se encuentra el extremo cerca de la zona de discontinuidad de forma que el algoritmo descrito en la Sección 6.2.3.1 se ejecute sólo en esta zona, evitando las detecciones falsas. Siguiendo el proceso descrito en 6.2.3.3, una vez que la línea de discontinuidad se ha detectado  $I_d$ , la rotación y traslación de la cámara se determina en cada iteración de la tarea de control visual. Esta información se emplea para

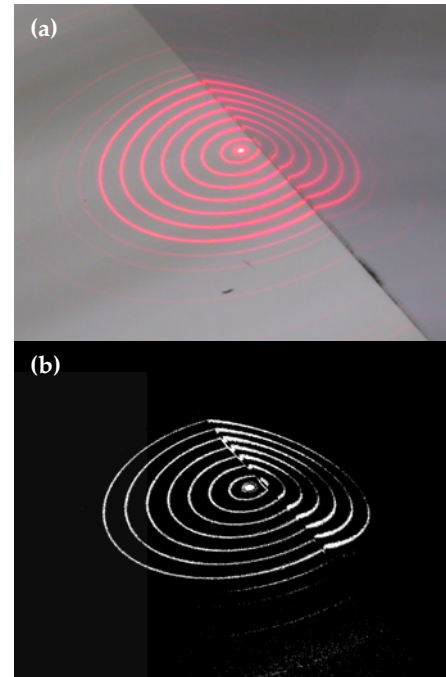


Fig. 6-19 Discontinuidad de la superficie

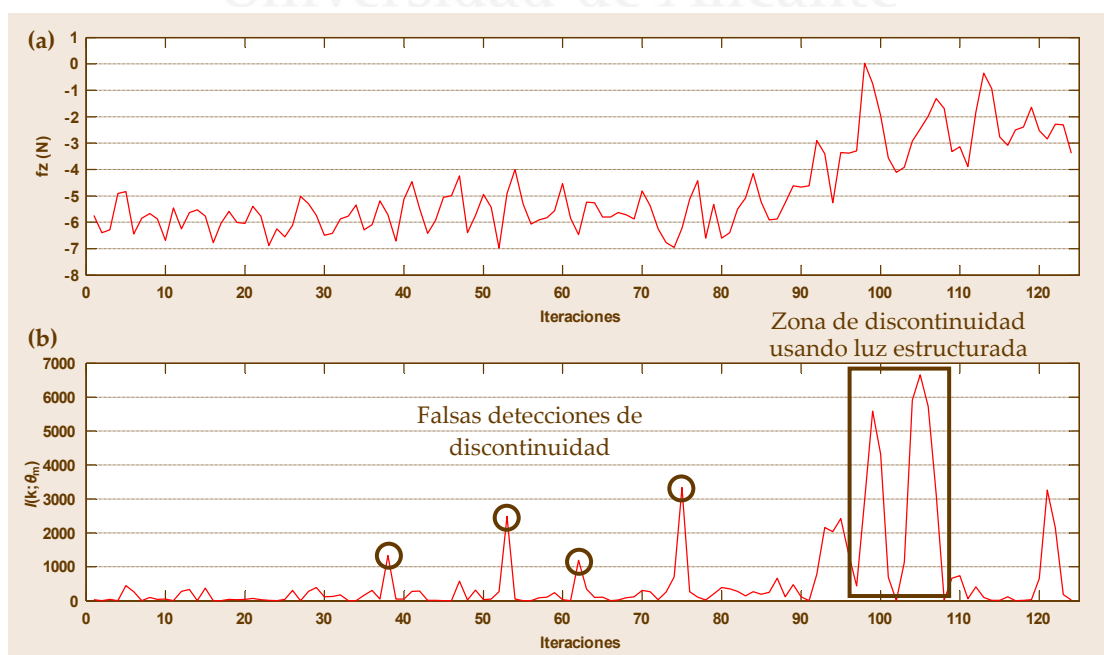


Fig. 6-18 Evolución de la fuerza  $f_z$  y  $l(k; \theta)$

proyectar la posición de la línea de discontinuidad en cada iteración,  $kI_d$ . De esta forma, cuando la línea esté lo suficientemente cerca de la posición del extremo del robot, se ejecuta el algoritmo descrito en la sección 6.2.3.1 para determinar el punto exacto de la discontinuidad (este proceso se ilustra en la Fig. 6-20.(b)).

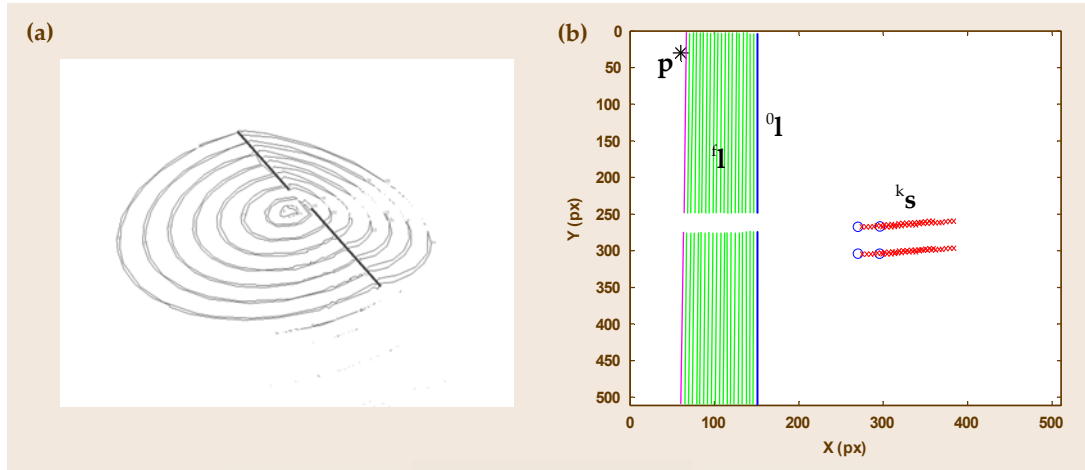


Fig. 6-20 (a) Zona de discontinuidad usando el método descrito en el apartado 5.2.3.2 (b) Proceso llevado a cabo para determinar el punto en el que el extremo llega a la discontinuidad

### 6.3.1.1.3.2 Experimento 2. Superficie cóncava

En este nuevo experimento, el sistema es probado en el seguimiento de la superficie mostrada en la Fig. 6-21. En el experimento descrito en el Apartado 6.2.4.3.1, el robot interactúa con una superficie convexa mientras realiza el seguimiento de la trayectoria en imagen deseada. En este nuevo experimento, la superficie presenta una discontinuidad cóncava (ver Fig. 6-21). En la Fig. 6-22 se representan las fuerzas medidas por el sensor de fuerza y la evolución del parámetro  $l(k;\theta)$  obtenidos en el seguimiento de la superficie. La zona de discontinuidad se segmenta utilizando el método descrito en el Apartado 6.2.3.2. La Fig. 6-23.(a) muestra esta zona de discontinuidad, representada por dos líneas rectas. Para garantizar una detección más precisa y robusta de la discontinuidad, estas dos líneas se proyectan en la imagen para cada una de las sucesivas iteraciones del bucle de control. Para ello, se emplea el método propuesto en el Apartado 6.2.3.3. De esta forma, como muestra la Fig. 6-23.(b), el sistema es capaz de determinar con precisión el momento en que la herramienta ubicada en el extremo del robot se encuentra cerca de la zona de discontinuidad. En este momento, el sistema basado en la interacción de fuerzas descritas en la Sección 6.2.3.1 es capaz de obtener la nueva zona de discontinuidad evitando las falsas detecciones.

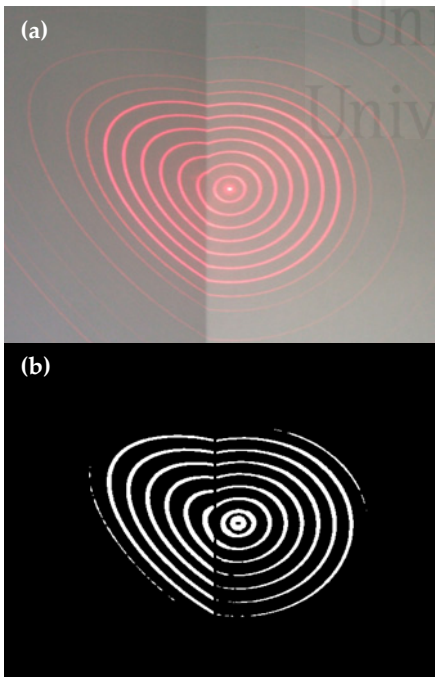


Fig. 6-21 Vista de la discontinuidad de la superficie. Experimento 2

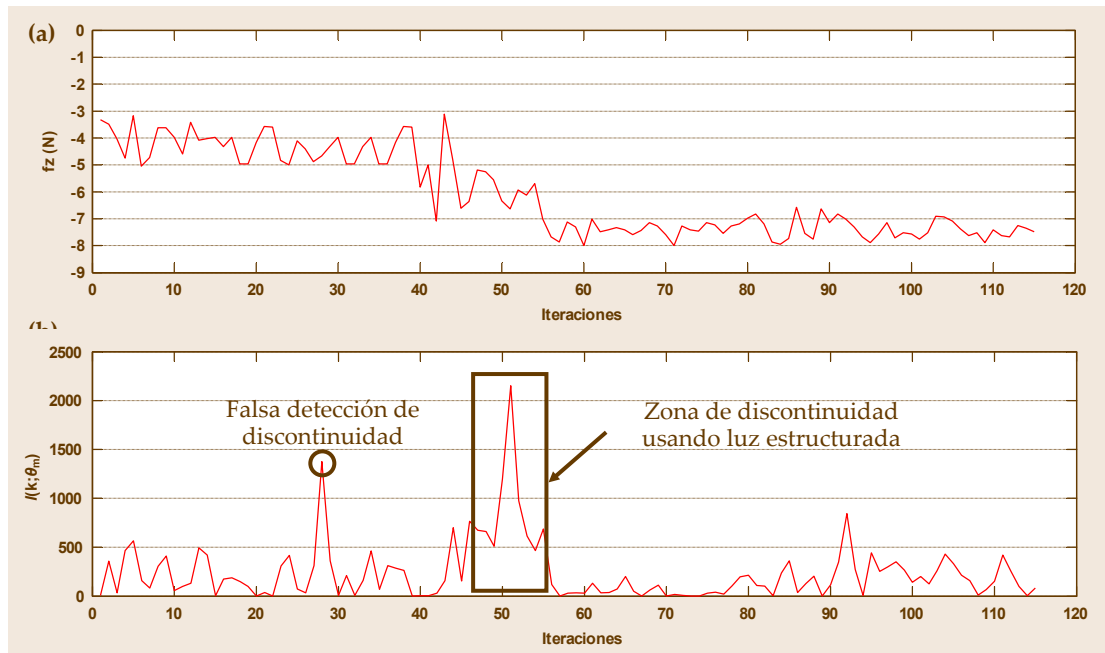


Fig. 6-22 Evolución de la fuerza  $f_z$  y  $l(k;\theta)$

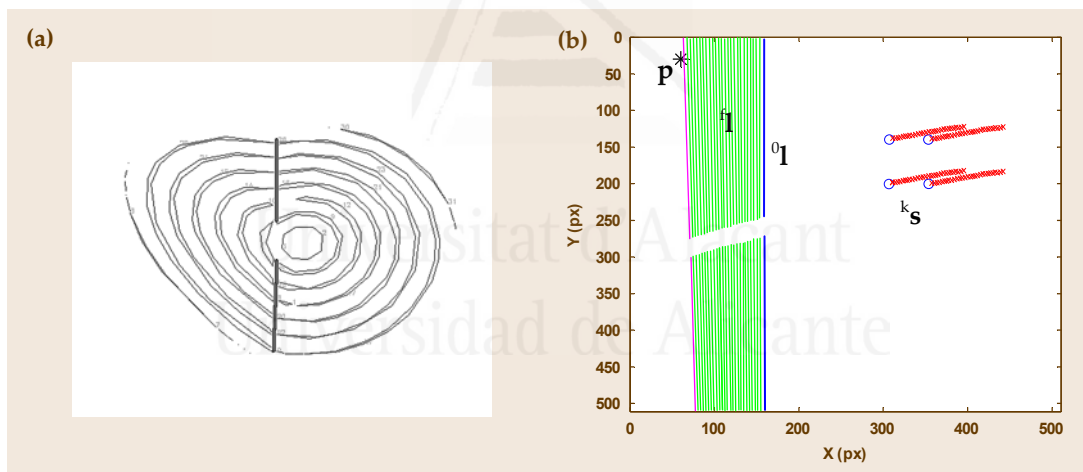


Fig. 6-23 Experimento 2: (a) Zona de discontinuidad usando el método descrito en el apartado 5.2.3.2 (b) Proceso llevado a cabo para determinar el punto en el que el extremo llega a la discontinuidad

### 6.3.1.2 Modificación de la trayectoria con la matriz de interacción fuerza-imagen

#### 6.3.1.2.1 Resultados de simulación

Con el objetivo de demostrar el correcto comportamiento del sistema se describe un experimento simulado en el cual las características visuales van variando según aumenta la fuerza de interacción en Z. En concreto, se trata de una simulación de un descenso en profundidad en el que la fuerza de interacción en el eje Z aumenta linealmente (1 N. en cada iteración) y las características siguen la evolución que se muestra en la Fig. 6-24 (un píxel en  $(x,y)$  por cada iteración).

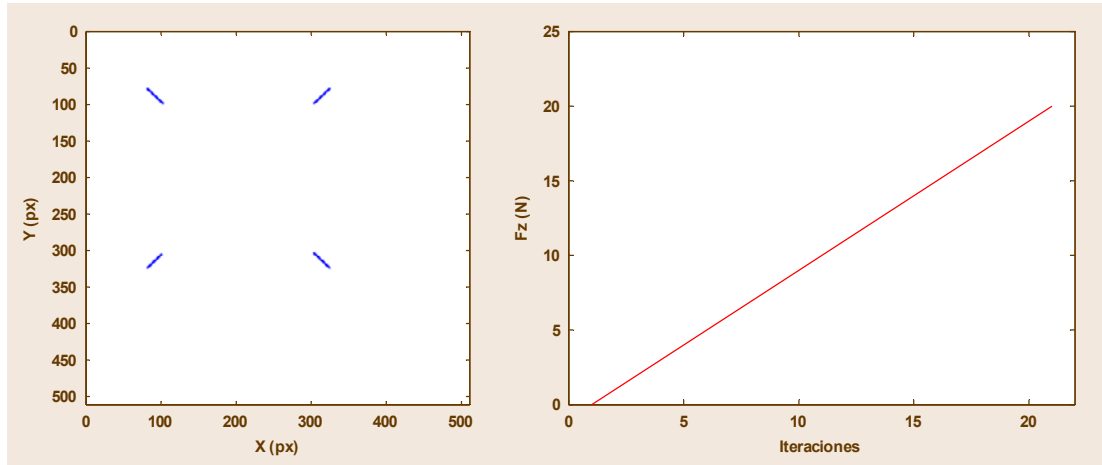


Fig. 6-24 Evolución de las características en la imagen y de las fuerzas de interacción durante el experimento

Los valores iniciales considerados para la matriz de interacción fuerza-imagen  $\hat{\mathbf{L}}(0)$  y  $\hat{\mathbf{P}}(0)$  son respectivamente:

$$\hat{\mathbf{L}}(0) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.001 \\ 0 & 0 & 0.001 \\ 0 & 0 & 0.001 \\ 0 & 0 & 0.001 \\ 0 & 0 & 0.001 \\ 0 & 0 & 0.001 \\ 0 & 0 & 0.001 \\ 0 & 0 & 0.001 \end{bmatrix}, \quad (6.48)$$

$$\hat{\mathbf{P}}(0) = \begin{bmatrix} 9 & 0 & 0 \\ 0 & 9 & 0 \\ 0 & 0 & 9 \end{bmatrix}.$$

En 3 iteraciones ya se ha obtenido el muy próximo al adecuado para la matriz de interacción ( $\lambda = 0.9$ ):

$$\hat{\mathbf{L}}(3) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -0.9709 \\ 0 & 0 & -0.9709 \\ 0 & 0 & 0.9710 \\ 0 & 0 & -0.9709 \\ 0 & 0 & 0.9710 \\ 0 & 0 & 0.9710 \\ 0 & 0 & -0.9709 \\ 0 & 0 & 0.9710 \end{bmatrix}. \quad (6.49)$$

La matriz de interacción real empleada en la simulación es:

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (6.50)$$

### 6.3.1.2.2 Resultados experimentales

En estos experimentos se ha realizado el montaje experimental representado en la Fig. 6-25. La mesa con la que colisiona el robot presenta cierto grado de compresibilidad. De esta forma dependiendo de la fuerza con la que interactúa el robot el sistema es capaz de observar claramente una modificación de las características en la imagen. A partir de esta información se determina el valor de la matriz de interacción fuerza-imagen según se describió en el apartado 6.2.2.2.1. Esta matriz es a su vez empleada para modificar la trayectoria deseada en la imagen de forma que se consiga mantener una fuerza de interacción constante entre el robot y la superficie. Como se ha descrito en trabajos anteriores [Pomares-2005c] la modificación de la información visual a partir de la información de interacción con el entorno permite garantizar la coherencia entre ambos sistemas sensoriales. De esta forma también se evita que se produzcan acciones de control contradictorias entre ambos sistemas sensoriales. En estos experimentos se ilustran dos ejemplos sencillos pero en los que se observa con claridad el correcto comportamiento del sistema propuesto.

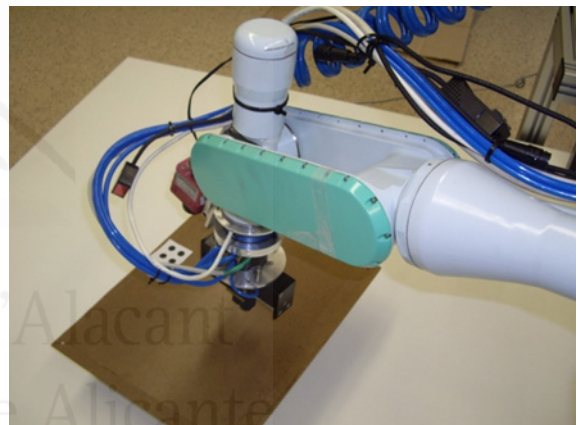


Fig. 6-25 Montaje experimental

#### 6.3.1.2.2.1 Experimento 1

En este experimento el robot lleva a cabo el seguimiento de una trayectoria usando el sistema descrito en el Capítulo 3. Sin embargo, durante la trayectoria el robot golpea una mesa tal y como ilustra la Fig. 6-25. Usando el algoritmo descrito en el Apartado 6.2.2.2.1, el sistema determina el valor de la matriz de interacción fuerza-imagen, obteniendo la matriz representada en la Ecuación (6.51) ( $\lambda = 0.95$ ). Finalmente, considerando como fuerza de contacto deseada en la dirección Z 20 N, y la estrategia de control visual-fuerza propuesta, la evolución de las fuerzas de interacción se representa en la Fig. 6-26. Esta figura muestra el correcto

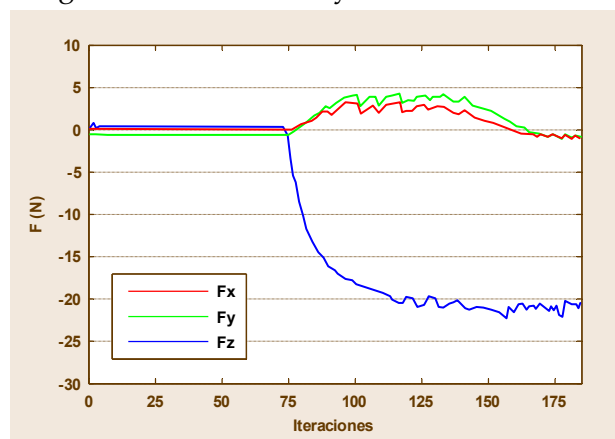


Fig. 6-26 Evolución de las fuerzas de interacción durante el experimento. Experimento 1



comportamiento del sistema, que permite controlar la fuerza de contacto con la superficie al valor deseado de 20 N.

$$\hat{\mathbf{L}} = \begin{bmatrix} 0.6079 & -0.6347 & -0.0469 \\ -0.6079 & 0.6347 & 0.0469 \\ -0.6079 & 0.6347 & 0.0469 \\ -0.6079 & 0.6347 & 0.0469 \\ 0.6079 & -0.6347 & -0.0469 \\ 0.6079 & -0.6347 & -0.0469 \\ 0.6079 & -0.6347 & -0.0469 \end{bmatrix}. \quad (6.51)$$

### 6.3.1.2.2 Experimento 2

En este experimento el robot también está siguiendo una trayectoria en la imagen usando el controlador descrito en el Capítulo 3. Sin embargo, en este caso durante la interacción el robot debe mantener una fuerza constante de 40 N en la dirección Z contra la superficie de contacto.

Se usa la misma superficie de interacción, por eso se vuelve a considerar la matriz de interacción fuerza-imagen indicada en la Ecuación (6.51) Con estas consideraciones, se obtienen las fuerzas de interacción representadas en la Fig. 6-27 cuando el robot golpea la superficie de contacto. En esta figura es posible observar que el sistema es capaz

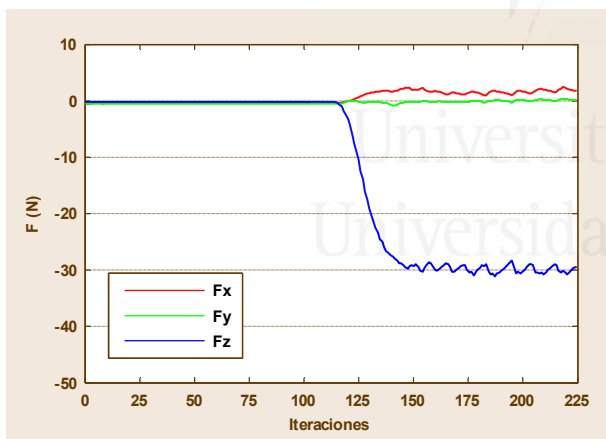


Fig. 6-27 Evolución de las fuerzas de interacción durante el experimento. Experimento 2

de mantener una fuerza constante de 40 N entre el robot y la superficie en la dirección Z. Por lo tanto, la información visual se emplea no sólo para controlar el seguimiento de la trayectoria, sino también para controlar la interacción del robot con el entorno del trabajo.

Estos experimentos se han realizado con una superficie flexible, que permite observar un mayor cambio en las características visuales para mantener una misma fuerza. La matriz de interacción fuerza-imagen estimada on-line permite aplicar este método de fusión de visión y fuerza en superficies

con distinto grado de rigidez. Sin embargo, en los experimentos se ha querido controlar las fuerzas de contacto por debajo de unos límites que mantengan la seguridad del robot, al tiempo que se permita obtener resultados válidos del método propuesto.

En [video6-1.mpg](#) localizado en la carpeta VidCap6 del DVD adjunto se pueden ver dos experimentos en los que se modifica la trayectoria en imagen a partir de la matriz de interacción Fuerza-Imagen.

### 6.3.2 Tarea de inserción mediante control visual-fuerza

El siguiente experimento utiliza la configuración descrita en la Fig. 6-12 para insertar el extremo de la herramienta en el objeto representado en la Fig. 6-28.(a).

Debido a la gran precisión que se requiere para la inserción, una inserción perfecta es imposible de garantizar si se usa únicamente información visual. Como se muestra en la Fig. 6-28.(b), sin control de fuerza, el más leve contacto con el borde de la apertura causa que las fuerzas se incrementen rápidamente y que la inserción no se lleve a cabo. Para demostrar el comportamiento del sistema utilizando información visual y de fuerza de forma simultánea, se describen a continuación dos experimentos, en los que la inserción se ejecuta en diferentes posiciones. En la Fig. 6-29, se muestra la trayectoria de la herramienta situada en el extremo del robot durante las dos inserciones. La apertura en la que se realiza la inserción se muestra para verificar el correcto comportamiento.

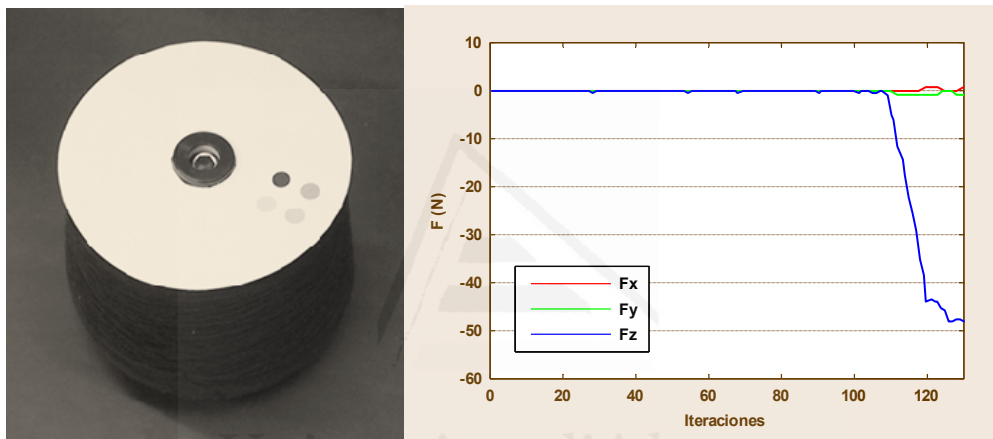


Fig. 6-28 (a) Objeto a seguir por el sistema de seguimiento de trayectorias en la imagen basado en control visual virtual (b) Fuerzas obtenidas sin control de fuerzas

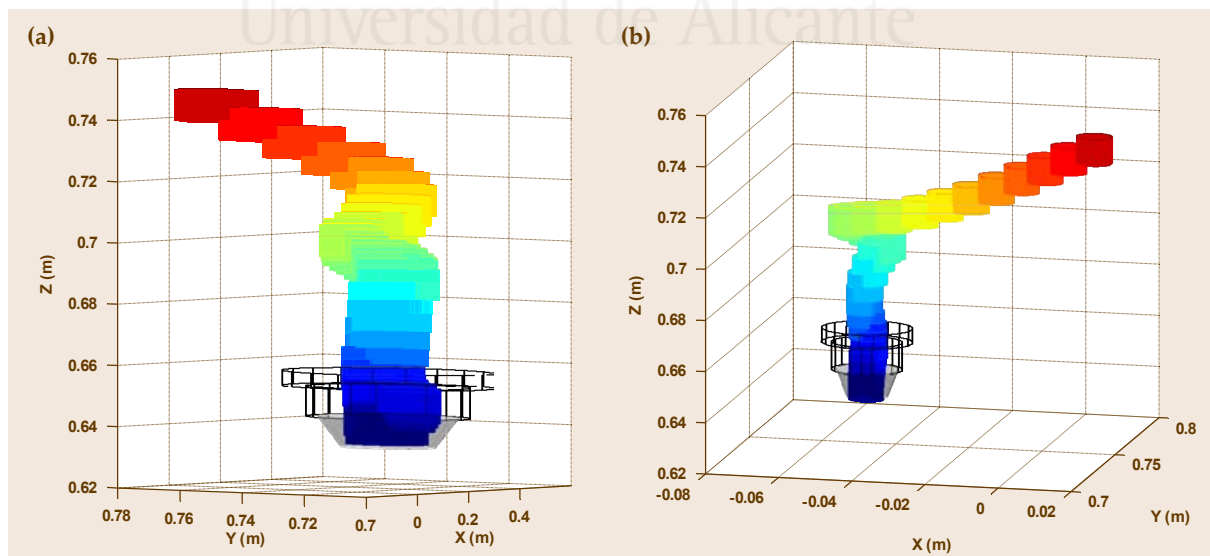


Fig. 6-29 Trayectoria seguida por el robot en dos experimentos de inserción distintos

En la Fig. 6-30, se observa que al fusionar la información visual y de fuerza, las fuerzas se mantienen bajas durante la trayectoria. Las fuerzas se compensan rápidamente, y la trayectoria se corrige de forma precisa, permitiendo así la inserción.

Si la trayectoria no se genera de forma correcta, la inserción no se puede conseguir. Por eso, la trayectoria en la imagen se debe modificar dependiendo de las fuerzas de interacción. Este aspecto queda ilustrado en la Fig. 6-31. En este caso, el robot golpea la superficie. Una vez que se ha reconocido esta superficie con los mecanismos descritos en el apartado 6.2.3, la trayectoria en la imagen se modifica (tal y como se explicó en el apartado 6.2.2) permitiendo el uso conjunto de ambos sensores para controlar la tarea.

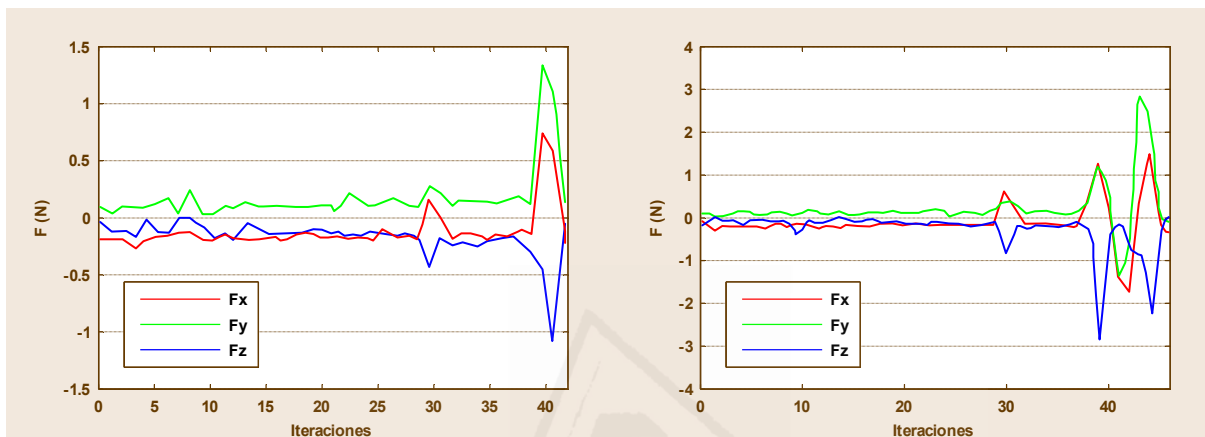


Fig. 6-30 Evolución de la fuerza de interacción del robot con su entorno de trabajo en los dos experimentos

La trayectoria 3-D que el robot debe seguir durante la tarea de inserción representada en la Fig. 6-31 se puede ver en el espacio imagen en la Fig. 6-32.(a). Esta trayectoria necesita ser modificada por el hecho de que el robot colisiona con la superficie del objeto antes de que llegue a su posición final. La Fig. 6-32.(b) muestra la trayectoria en el espacio imagen de las características obtenida durante la tarea de inserción descrita.

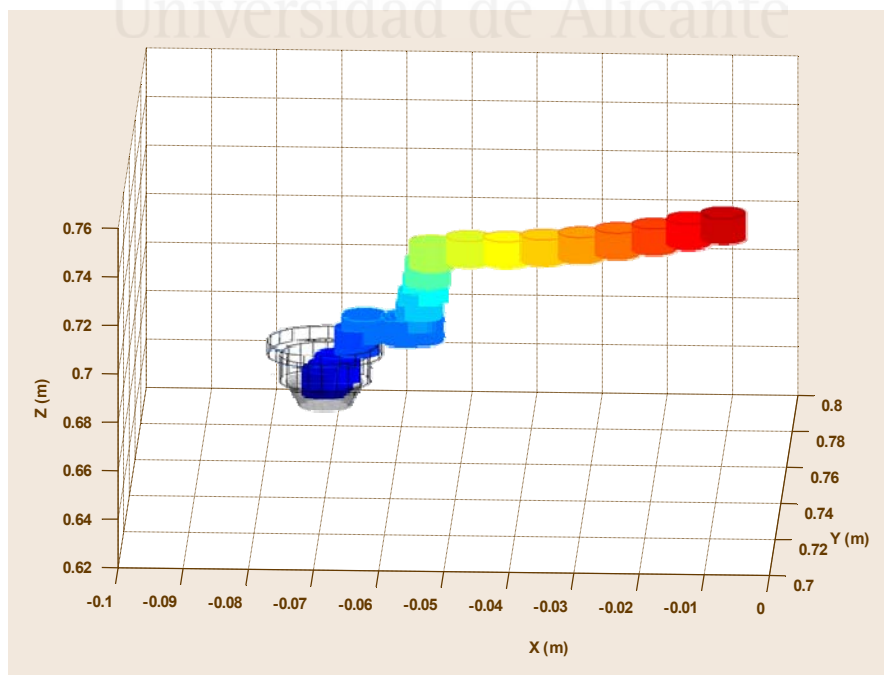


Fig. 6-31 Trayectoria en el espacio Cartesiano 3-D durante la tarea de inserción cuando el robot colisiona con la superficie

El sistema detecta la colisión y la trayectoria se replanifica de forma que la inserción pueda completarse siguiendo la trayectoria más cercana a la deseada permitida por las restricciones (ver apartado 6.2.2).

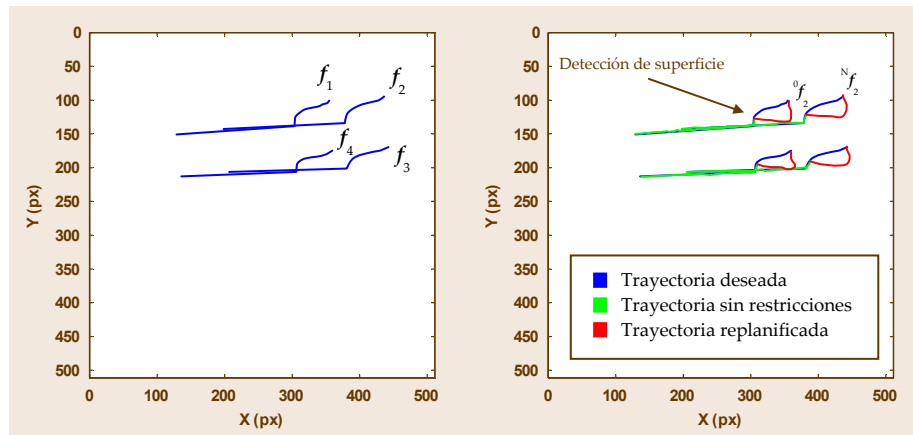


Fig. 6-32 (a) Trayectoria deseada en imagen durante la tarea de inserción (b) Trayectoria seguida por el robot durante la tarea de inserción cuando colisiona con la superficie

## 6.4 Conclusiones

Las diferentes propiedades de la información obtenida de los sensores visual y fuerza, pueden provocar que, si no se toman las medidas oportunas, las acciones de control procedentes de ambos sensores puedan llegar a ser contradictorias. Así, el sistema de visión puede establecer una trayectoria que no sea posible en base a la información de interacción procedente del sensor de fuerza. En este Capítulo se ha descrito un nuevo método global para fusionar la información sensorial procedente de un sistema de visión por computador y de un sensor de fuerza.

El método descrito hace uso del control de impedancia para permitir al robot interaccionar con su entorno. La fusión de esta información de fuerza con la visual se consigue mediante la realimentación visual a través del controlador descrito en el Capítulo 3 que permite seguir trayectorias en la imagen de una manera intemporal. Cuando se detecta una interacción con el entorno, se modifica la trayectoria deseada en la imagen para que el método de seguimiento de trayectorias en la imagen basado en control visual virtual tenga en cuenta esta interacción. Para ello se han propuesto dos aproximaciones. La primera de ellas reconstruye la trayectoria en imagen a partir de la reconstrucción virtual de la trayectoria 3-D de la cámara a partir de la matriz de homografía 2-D. El segundo método propuesto está basado en la estimación de la matriz de interacción fuerza-imagen. Este método no requiere conocimiento a priori del modelo cinemático del robot, la calibración de la cámara o de calibración sensorial entre la cámara y el sensor de fuerza. La matriz de interacción fuerza-imagen relaciona los cambios en el espacio imagen con cambios en las fuerzas de interacción. Para estimar el valor de esta matriz se aplica un método basado en el algoritmo de Gauss-Newton.

El esquema de control propuesto necesita recalcular la trayectoria en la imagen cada vez que la superficie de contacto se modifica. Debido a ello, se ha propuesto un método robusto de detección de cambios en las superficies basado en las fuerzas de

interacción y en luz estructurada. Primero, se ha probado que únicamente con la información de las fuerzas de interacción no se consigue detectar las discontinuidades en las superficies. Esta aproximación es sensible a fricciones o incluso el alto nivel de ruido de la señal del sensor de fuerza. Para mejorar las detecciones se ha incluido información sensorial adicional a partir de un láser. Usando luz estructurada, el sistema es capaz de automáticamente detectar las zonas en las que puede haber una discontinuidad. De esta forma, únicamente se consideran correctas las discontinuidades determinadas por el sensor de fuerza que están cerca de las determinadas usando luz estructurada.



Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante

# Resultados

## 7 Resultados

A lo largo de este Capítulo se describen los distintos experimentos realizados sobre las aproximaciones de control visual, control de fuerza y control visual-fuerza propuestos en la presente Tesis.

En primer lugar se presenta una aplicación desarrollada en C++: ViSeC. Esta aplicación permite realizar diversos experimentos de control visual, incluyendo tareas básicas de posicionamiento o experimentos más complejos como seguimiento de trayectorias.

Los experimentos mostrados en este Capítulo se enmarcan dentro del proyecto MEC “Diseño, implementación y experimentación de escenarios de manipulación inteligentes para aplicaciones de ensamblado y desensamblado automático (DPI2005-06222)”.

Se muestran tres aplicaciones complejas que requieren la cooperación entre un operador humano y uno o dos robots manipuladores. Las tres aplicaciones emplean los sistemas propuestos en esta Tesis para guiar y controlar la interacción del robot con su entorno.

La primera aplicación describe el ensamblado automatizado de una estructura metálica, la segunda es una aplicación donde se cambia la bombilla de una farola y en la tercera aplicación se presenta una prueba donde un opera-

7.1	<b>Introducción</b> .....	195
7.2	<b>Herramienta para la ejecución de tareas de control visual: ViSeC</b> .....	197
7.3	<b>Ensamblado de una estructura metálica</b> .....	199
7.3.1	Arquitectura del sistema...	199
7.3.2	Descripción del proceso de montaje de la estructura .....	201
7.4	<b>Cambio de una bombilla en una farola</b> .....	210
7.4.1	Arquitectura del sistema...	210
7.4.2	Descripción del proceso de cambio de la bombilla ..	211
7.4.3	Sistema de posicionamiento del brazo robótico.....	213
7.4.4	Calibración on-line de la cámara .....	217
7.4.5	Detección del humano durante el seguimiento de trayectorias .....	218
7.4.6	Medición de las fuerzas en el extremo para detectar el desenroscado de los distintos elementos.....	219
7.5	<b>Desensamblado de una mini-nevera</b> .....	220
7.5.1	Descripción de la tarea .....	221
7.5.2	Necesidad de un sistema de seguimiento intemporal....	224
7.6	<b>Conclusiones</b> .....	

dor humano y un robot manipulador cooperan para realizar el desensamblado de una mini-nevera. En la primera aplicación se muestra la arquitectura software utilizada para las tres pruebas.

### 7.1 Introducción

En el presente Capítulo se describen distintos experimentos prácticos que ilustran los resultados obtenidos a partir de las investigaciones desarrolladas en la presente



Tesis. El principal objetivo de estas pruebas está vinculado a los objetivos generales del proyecto MEC “Diseño, implementación y experimentación de escenarios de manipulación inteligentes para aplicaciones de ensamblado y desensamblado automático (DPI2005-06222)”, proyecto principal en el que se enmarca mi beca FPI de la Generalitat Valenciana (BFPI06/15) y, por lo tanto, las investigaciones desarrolladas en esta Tesis Doctoral.

La finalidad del proyecto es diseñar, implementar y experimentar un escenario inteligente, adecuadamente sensorizado, que permita abordar con garantías tareas complejas de manipulación tales como ensamblado y desensamblado, a realizar bien de forma totalmente automática por un sistema multirobot, o semi-automáticamente con intervención humana.

En los sucesivos Apartados se describirán distintos escenarios complejos de ensamblado y desensamblado, donde los sistemas de control propuestos en esta Tesis adquieren un papel fundamental para permitir, no sólo tareas de interacción automática de los robots con su entorno, sino también tareas semiautomáticas seguras donde un operador humano debe introducirse en el espacio de trabajo de los robots para cooperar con ellos.

En este tipo de tareas resulta crucial que el sistema de guiado del robot presente un comportamiento intemporal que permita resolver cualquier evento de obstrucción de la trayectoria que el robot estaba siguiendo, ya sea por el contacto inesperado con un objeto del entorno o por la presencia cercana del humano. Con el sistema de seguimiento propuesto en el Capítulo 3 se consigue este comportamiento al mismo tiempo que se permite especificar una velocidad constante durante el seguimiento de la trayectoria deseada. Mejorado con la calibración on-line multi-imagen presentada en el Capítulo 4, el método de seguimiento propuesto es capaz de repetir la trayectoria incluso si se varían los parámetros intrínsecos de la cámara.

Este sistema de control del robot permite resolver las situaciones de grandes desplazamientos dentro del espacio de trabajo, evitando obstáculos fijos al poder indicarle una trayectoria a seguir al robot. Cuando se implementan escenarios como los que se incluyen en los objetivos del proyecto MEC mencionado, se requiere algún sistema que permita controlar simultáneamente la posición del extremo y la fuerza que éste ejerce sobre el entorno. En el Capítulo 6 se ha propuesto un sistema de control de impedancia realimentado con el sistema de seguimiento intemporal desarrollado en el Capítulo 3. Además, se proponen dos técnicas que permiten, por un lado detectar un cambio en la superficie de contacto, y por otro lado modificar la trayectoria deseada en imagen cuando este cambio se produce, de forma que la trayectoria en imagen sea coherente con las fuerzas de interacción medidas directamente por el extremo del robot.

A continuación, se describe la aplicación sobre la que se han desarrollado todas las pruebas de ensamblado y desensamblado. Posteriormente se describirán tres escenarios distintos de ensamblado y desensamblado inteligente con tareas automáticas y semiautomáticas: el montaje de una estructura metálica, el cambio de una bombilla en una farola, y el desensamblado parcial de una mini-nevera.

## 7.2 Herramienta para la ejecución de tareas de control visual: ViSeC

Las primeras investigaciones realizadas en el marco de la presente Tesis requerían el diseño e implementación de un software capaz de ejecutar distintos esquemas de control visual. La aplicación desarrollada se denomina ViSeC (se pueden encontrar más detalles en [GarciaGJ-2004a, GarciaGJ-2004b]). Esta herramienta permite practicar algoritmos de control visual en un robot industrial real y simulado, aprendiendo aspectos básicos de estos sistemas de control visual como la influencia de la ganancia en la velocidad de convergencia, la necesidad del cálculo de la distancia entre cámara y objeto, o la extracción de las características elegidas. Los distintos esquemas de control visual se pueden aplicar a un robot real, situado en el laboratorio del grupo AUROVA en la Universidad de Alicante. Se trata de un robot antropomórfico de siete grados de libertad, un Mitsubishi PA-10 (ver Fig. 7-1). El robot dispone de una cámara situada en su extremo con la que se adquirirán las imágenes que permitan controlar al robot mediante distintos esquemas de control visual.

Dentro de ViSeC se dispone de un entorno simulado generado mediante OpenGL en el que se encuentra el PA-10 y una mesa giratoria. Este simulador permite realizar tareas de posicionamiento del robot en pantalla ofreciendo funcionalidades como la repetición de la trayectoria seguida por el robot real tras la ejecución del control visual o la posibilidad de ver la acción desde distintos puntos de vista. La Fig. 7-2 muestra la pantalla principal del programa, donde se puede ver el simulador del robot, las barras de herramientas, el menú o las herramientas de posicionamiento del robot.

El programa permite configurar los parámetros de la cámara, lo que permitirá trabajar de forma independiente a ésta. De esta forma, el cambio de la cámara no va a suponer tener que modificar el código de la aplicación. Tras el correcto calibrado de la cámara se introducen los valores obtenidos en el cuadro de diálogo correspondiente. Es posible también introducir aquí el error permitido en píxeles, que permitirá concluir las tareas de control visual sin ser excesivamente exigentes en cuanto a la precisión. Siguiendo con la configuración de parámetros, se pueden modificar las velocidades máximas tanto lineales como rotacionales que se le van a mandar al robot durante el control visual a modo de filtro que evite enviar velocidades excesivas y sature las velocidades que el controlador visual envía. En otra hoja del cuadro de configuración de parámetros se puede modificar el valor de la ganancia de la ley de control. También se puede activar la traza visual, que dejará un rastro de la posición por la que ha pasado cada característica en cada iteración del bucle de control. En ocasiones el refresco por

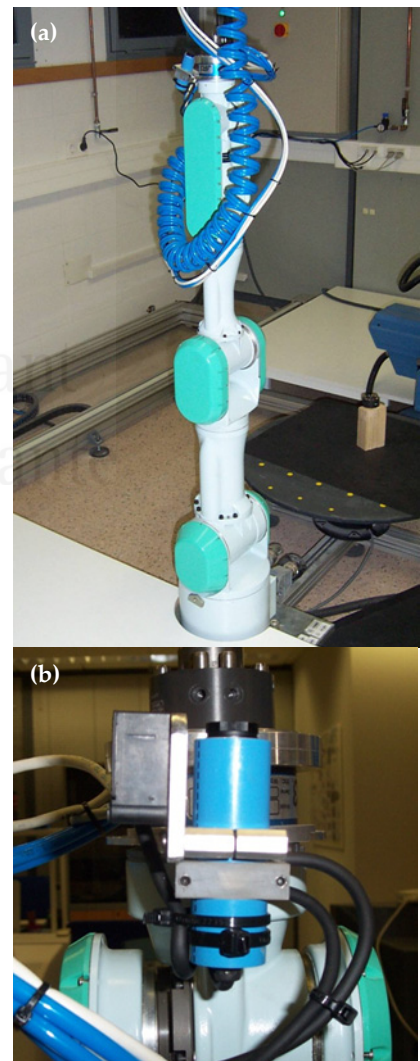


Fig. 7-1 (a) Arquitectura del sistema. (b) Detalle de la cámara situada en el extremo del robot

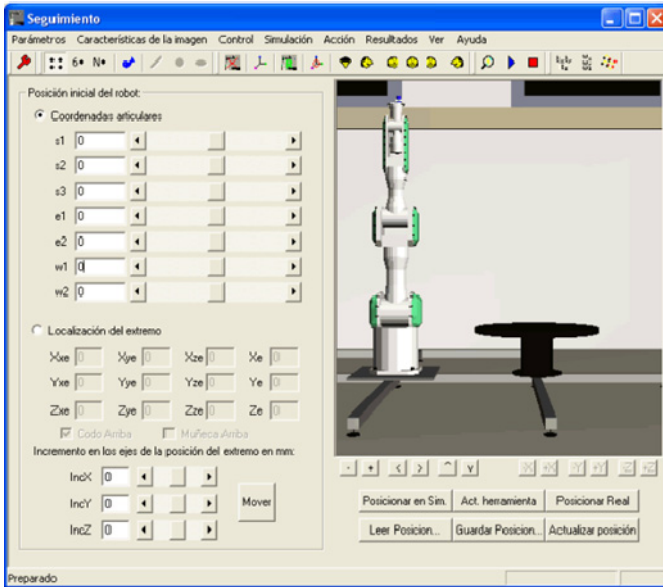


Fig. 7-2 ViSeC: Aplicación utilizada para realizar las pruebas de control visual

momentos invariantes. En video7-1.wmv y video7-2.wmv de la carpeta VidCap7 del DVD adjunto se pueden ver dos aplicaciones de control visual realizadas sobre ViSeC.

El simulador (ver Fig. 7-3) permite realizar tareas previas al control como posicionamiento inicial del robot, ya sea mediante coordenadas articulares, localización del extremo o incrementos en los ejes. También permite realizar tareas posteriores al control, e incluso simultáneas, como la repetición de la trayectoria seguida por el robot real en la ejecución. Se puede cambiar el punto de vista del simulador. Hay una serie de vistas predefinidas. También existe una vista libre que permite girar el ángulo de la cámara en cualquier eje. Por último, existe con cualquier vista la capacidad de acercar o alejar la cámara de la acción.



Fig. 7-3 Vista libre en el simulador de ViSeC

Este módulo también permite realizar tareas de posicionamiento preciso, al permi-

pantalla puede ralentizar el proceso y desactivarlo puede ayudar a obtener una cadencia mayor de control.

Sobre esta aplicación se implementan los esquemas de control visual desarrollados en la presente Tesis. Así, están disponibles desde un sistema de control visual basado en imagen clásico que permite realizar tareas de posicionamiento punto a punto a esquemas más complejos como el sistema de seguimiento descrito en el Capítulo 3. Para ello se ha implementado la matriz de interacción para puntos (pudiendo decidir el número de puntos característicos en función del objeto y la tarea a realizar), para elipses o incluso para

momentos invariantes. En video7-1.wmv y video7-2.wmv de la carpeta VidCap7 del DVD adjunto se pueden ver dos aplicaciones de control visual realizadas sobre ViSeC.

La aplicación dispone de un módulo de aprendizaje que permite almacenar la evolución de las características visuales durante una trayectoria determinada. Esto permite obtener fácilmente la trayectoria deseada que posteriormente servirá de referencia para el método de seguimiento intemporal.

También se le ha añadido un módulo que permite realizar la calibración on-line

multi-imagen a partir de control visual virtual. Las imágenes procesadas durante el seguimiento de trayectorias, o durante una tarea de posicionamiento básica de control visual, permiten almacenar la información de la posición en imagen de cada característica. Este módulo también permite realizar tareas de posicionamiento preciso, al permi-

tir obtener de forma precisa la posición relativa entre un objeto y la cámara. También permite ejecutar tareas de control visual sólo en el simulador [GarcíaGJ-2006].

### 7.3 Ensamblado de una estructura metálica

La primera gran aplicación que se describe, enmarcada dentro del proyecto MEC mencionado en el Apartado 7.1, se trata del ensamblado de una estructura metálica. Esta aplicación se compone de diversas tareas de ensamblado, unas automáticas y otras semiautomáticas. A continuación se describe la arquitectura del sistema.

#### 7.3.1 Arquitectura del sistema

La arquitectura del sistema (ver Fig. 7-4) se compone de dos robots Mitsubishi PA-10 de 7 grados de libertad que son capaces de trabajar de manera cooperativa. Ambos robots están equipados con un intercambiador de herramientas que permite elegir la herramienta más adecuada durante la tarea (pinzas de dos dedos, mano robótica, destornillador, cámara, ventosa, etc.). Los dos robots disponen de un sensor de fuerzas 67M25A-I40 de JR3. Inc. en su extremo.

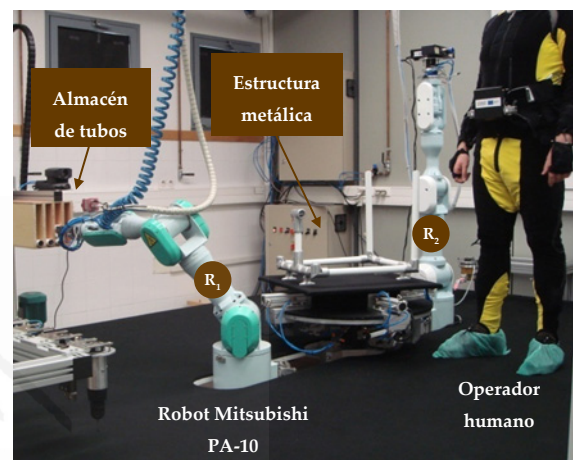


Fig. 7-4 Arquitectura del sistema

Para localizar de manera precisa a un humano que colabora en la tarea de ensamblado se emplean dos sistemas de localización: un sistema de captura de movimientos inercial (GypsyGyro-18 de Animazoo) y un sistema de localización en interiores (Ubi-sense) basado en pulsos de banda ultra ancha (UWB). El sistema de captura de movimiento se compone de 18 pequeños sensores inerciales (giroscopios) que miden la orientación de las extremidades del humano. El sistema de localización UWB se compone de 4 sensores que se sitúan en posiciones fijas en el espacio de trabajo y de una pequeña etiqueta de control que lleva el operador humano. Esta etiqueta envía señales UWB a los sensores que estiman la posición global del humano.

El sistema de ensamblado inteligente de la estructura metálica se subdivide en distintos subsistemas. Cada subsistema trabaja en diferentes fases de las tareas de manipulación en los procesos de ensamblado, de forma que en diferentes fases del proceso de ensamblado pueden trabajar conjuntamente dos o más de los subsistemas que se describen a continuación:

- Subsistema de control visual: Este subsistema emplea una configuración “*eye-in-hand*” sobre un robot Mitsubishi PA-10. En este robot, encargado de obtener los tubos del almacén, se ha situado una cámara que se emplea para guiar al robot utilizando información visual. Así, en el extremo se sitúa una cámara PhotonFocus MV-D752-160 (ver configuración en la Fig. 7-5). Se usa una Coreco X64CL-Pro como tarjeta de adquisición y procesamiento de imágenes. La cámara es capaz de adquirir y procesar hasta 100 imágenes por segundo usando una resolución de





Fig. 7-5 Configuración "eye-in-hand" en el Robot 1

imagen de 320x240. Los sistemas de control visual descritos en el Capítulo 2 y en el Capítulo 3 de la presente Tesis permiten posicionar de manera segura al robot en un entorno de trabajo como el que se muestra en la Fig. 7-4. Para desplazamientos largos se emplea el método de seguimiento propuesto en el Capítulo 3, que permite al robot repetir una trayectoria en 3-D. Para posicionamientos precisos se realiza una convergencia de control visual virtual (descrito en el Capítulo 4) que permite obtener la posición relativa entre el objeto y la cámara.

- Subsistema de control visual-fuerza: El subsistema de control visual descrito anteriormente se mejora añadiendo un sensor de fuerza de JR3. Inc. Este subsistema se emplea durante las tareas de inserción para controlar tanto la posición del robot como la fuerza de interacción. En este caso, las técnicas de control visual-fuerza descritas en el Capítulo 6 se aplican para medir con precisión el contacto entre los objetos durante el proceso de inserción. Estos sistemas de manipulación de objetos requieren el uso combinado de visión (para el posicionamiento preciso del robot) y de fuerza (para el control de la interacción entre la herramienta del robot y su entorno). El empleo de la metodología descrita en la Fig. 6-6, permite resolver situaciones de cambio de superficie en los objetos con los que se está interactuando, modificando la trayectoria en imagen en función de las fuerzas de contacto deseadas sobre la superficie.
- Subsistema de cooperación: En diferentes fases de la tarea, se utilizan los dos robots Mitsubishi PA-10,  $R_1$  y  $R_2$ . Como se ha mencionado anteriormente, los dos robots están equipados con un intercambiador de herramientas en su extremo de forma que cada robot pueda cambiar dinámicamente de herramienta durante el proceso de ensamblado. Durante el ensamblado, el sistema debe determinar qué robot desarrolla la tarea principal y qué robot ayuda en su ejecución. Las tareas que cada robot debe desarrollar se distribuyen utilizando un planificador de tareas [Gil-2007, Torres-2009] que determina las acciones para el proceso de ensamblado. El robot  $R_1$  tiene a su disposición una pinza de dedos paralelos, un destornillador y una ventosa, mientras que el robot  $R_2$  tiene acceso a una mano de Barrett y una cámara de rango. La cámara de rango (PMD-Vision 19K) se usa para monitorizar, inspeccionar y detectar las partes de las piezas metálicas que componen la estructura utilizando técnicas de procesamiento de imágenes. Además, los robots comparten con un operador humano el espacio de trabajo en la tarea de construcción de la estructura metálica. Posteriormente se describirá una aproximación de interacción hombre-robot donde la tarea que está realizando el robot se modifica dependiendo de la localización del humano de forma que se mantenga siempre una distancia de seguridad para éste. Para localizar de forma precisa al humano se utiliza un sistema de posicionamiento global en interiores

basado en señales de banda ultra ancha (UWB de Ubisense) y un sistema de captura de movimientos inercial para localizar de forma precisa las extremidades del humano en el entorno. Así, se sigue el movimiento del humano que interacciona con el robot en su espacio de trabajo y se determina en tiempo real la posición de todas sus extremidades.

A continuación se describe cada uno de los subsistemas, empezando por el subsistema de posicionamiento preciso basado en control visual virtual.

### 7.3.2 Descripción del proceso de montaje de la estructura

En la Fig. 7-6.(a) se muestra la versión final de la estructura metálica que se va a ensamblar usando el sistema automático de ensamblaje descrito en el Apartado 7.3.1. La tarea implica la automatización del proceso de ensamblado de tubos y piezas de aluminio como las mostradas en la Fig. 7-6.(b). Los tubos se insertan de manera automática por los robots manipuladores. Sin embargo, la colocación de los conectores en forma de T es una tarea compleja que no puede ser desarrollada únicamente por dos robots. En este caso, se requiere la colaboración de un operador humano.

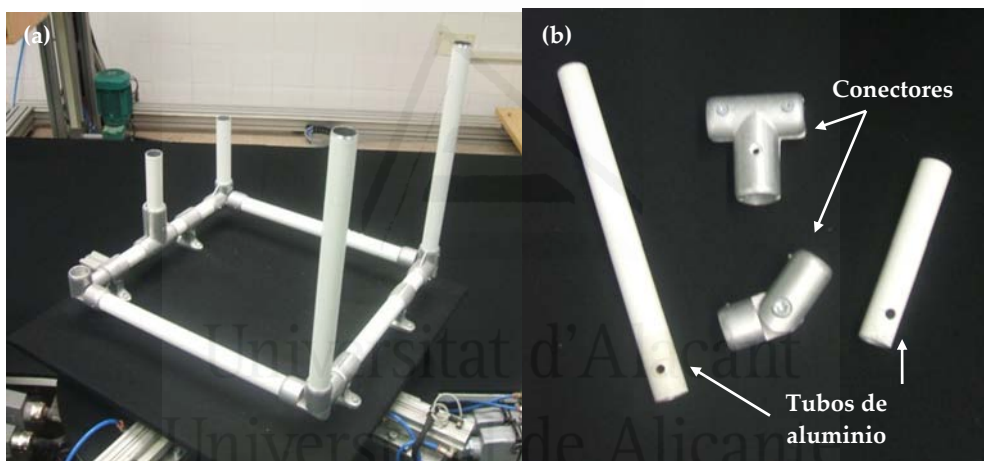


Fig. 7-6 (a) Estructura metálica (b) Tubos y conectores para el montaje de la estructura

La Fig. 7-7 muestra la secuencia de ensamblado obtenida a partir del planificador de tareas. Esta secuencia es posteriormente ejecutada por los distintos agentes que intervienen en la tarea de ensamblado. La Fig. 7-9 muestra la secuencia real durante la fase de ensamblado automático (ver vídeo [video 7-3.mpg](#) situado en la carpeta Vid-Cap7 del DVD adjunto). Las tareas establecidas por el planificador son las siguientes:

- Tarea 1. Se emplea el sistema de control visual-fuerza para insertar una barra de aluminio en uno de los conectores. Primeramente, el robot agarra un tubo situado en el almacén de tubos y posteriormente, el sistema de control visual descrito en el Capítulo 3 (y mejorado con la calibración multi-imagen en el Capítulo 4) guía al robot hasta la posición inicial de inserción (Fig. 7-9.(a)). En este momento se emplea la estrategia de control visual-fuerza descrita en el Apartado 6.2 para asegurar que la inserción se completa de manera satisfactoria (Fig. 7-9.(b)). La trayectoria en imagen se genera a partir de la luz de cuatro punteros láser sobre la mesa. Estos puntos son las características visuales del sistema de seguimiento basado en control visual virtual (ver Fig. 7-9.(a)).



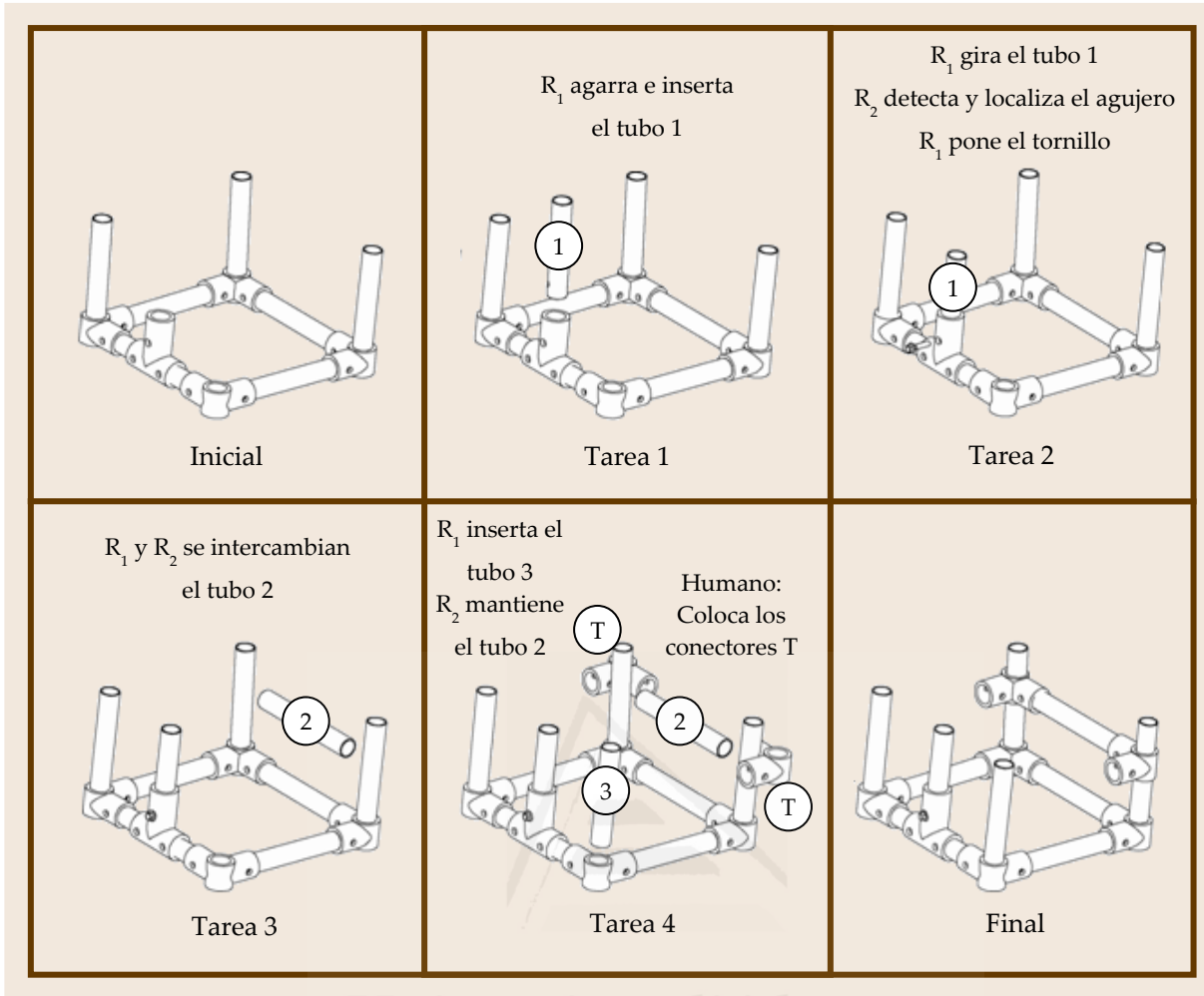
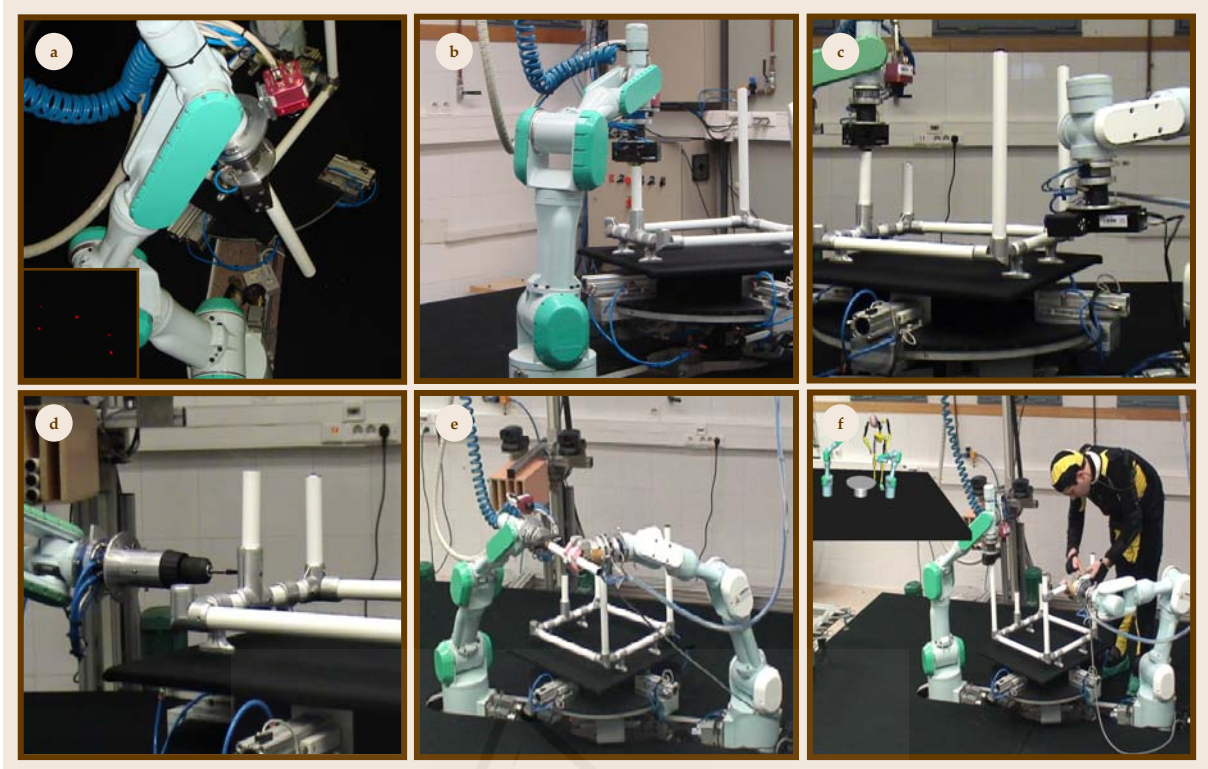


Fig. 7-7 CAD de la secuencia de ensamblado para construir la estructura metálica obtenida a partir del planificador de tareas

- Tarea 2. En esta tarea se necesita la cooperación entre los dos robots. El tubo que se inserta en la tarea anterior tiene un agujero que debe coincidir con el agujero del conector (ver los agujeros en la Fig. 7-6.(b)). Para conseguirlo, el robot  $R_1$  gira la barra ya insertada en el conector mientras el robot  $R_2$  sujeta una cámara de rango. La cámara de rango determina el momento en que los dos agujeros coinciden (Fig. 7-9.(c)) y finalmente, una vez que el tubo se ha orientado correctamente, se inserta un tornillo para fijar el tubo en la estructura (Fig. 7-9.(d)).
- Tarea 3. Cooperación robot-robot. En esta tarea un robot le da un tubo al otro (Fig. 7-9.(e)). El robot  $R_1$  coge la barra del almacén de tubos (ver Fig. 7-4) para dárselo al robot  $R_2$  y que este segundo robot pueda transportarlo a una posición determinada en su espacio de trabajo.
- Tarea 4. Como se ha mencionado anteriormente, la colocación de los conectores en forma de T requiere la colaboración de un operador humano. Esta tarea la ejecuta el humano simultáneamente con otra tarea de inserción desarrollada por el robot  $R_1$  como se describió en la Tarea 1 (Fig. 7-9.(f)).



**Fig. 7-9** Ejecución de las tareas de ensamblado (a) El sistema de control visual guía al robot para empezar la inserción (b) Se emplea una estrategia de control visual-fuerza para completar la tarea de inserción correctamente (c) Para determinar la posición correcta del tubo que permita poner el tornillo se emplea una cámara de rango (d) Atornillado para fijar el tubo en el conector (e) Cooperación robot-robot. Un robot le da un tubo al otro robot (f) Interacción humano-robot

A continuación se detallan aquellas tareas donde intervienen como sistemas principales los sistemas de control propuestos en esta Tesis. Ver [Corrales-2008b, Gil-2009, Pomares-2009] para profundizar más en el resto de tareas.

### 7.3.2.1 Tarea 1. Inserción de un tubo usando el controlador visual-fuerza

El proceso para ensamblar de forma automática distintos elementos en una estructura requiere del uso de distintas técnicas. A continuación se describe una aproximación para ensamblar una de las barras de la estructura. Este experimento de inserción se realiza sobre una versión simplificada de la estructura (ver Fig. 7-8 y Fig. 7-10). La estrategia descrita es posteriormente aplicada a la inserción de cualquier barra en la estructura que se quiera ensamblar.

Para realizar de forma flexible y satisfactoria la tarea, se hace necesario el empleo de técnicas como el sistema de seguimiento intemporal basado en control visual virtual descrito en los Capítulos 3 y 4, control visual virtual (definido en el Capítulo 2 y mejorado con la calibración multi-imagen en el Capítulo 4) y control visual-fuerza



**Fig. 7-8** Estructura de aluminio base para la tarea de inserción



**Fig. 7-10** Configuración del extremo del robot con la pieza a insertar

(descrito en el Capítulo 6) En el vídeo [video7-5.mpg](#) del DVD adjunto se puede ver una prueba de inserción donde se detallan las técnicas utilizadas. Se ha pretendido dotar a la aplicación de la suficiente flexibilidad para acometer la inserción en los diferentes tipos de piezas y en distintas posiciones. Por eso se deben realizar una serie de pasos previos a la inserción de la barra. Estos pasos previos están encaminados a posicionar el extremo de la barra justo sobre el eje de inserción de la pieza, de forma que un simple desplazamiento en la dirección de ese eje, unido a la acción del controlador de visión y fuerza, permitan cumplir con éxito la tarea. Las distintas fases para la correcta ejecución de la tarea se pueden ver en la [Fig. 7-11](#), donde se representa en un esquema un resumen del proceso.

El sistema de seguimiento propuesto en el Capítulo 3 permite posicionar de forma precisa el extremo del robot sobre el agujero de inserción. Su comportamiento intemporal permitirá al robot interactuar con el entorno siguiendo una trayectoria predefinida que evite los obstáculos fijos del espacio de trabajo. El comportamiento intemporal del sistema resulta crucial para obtener un sistema seguro de interacción humano-robot como se describirá más adelante. El posicionamiento relativo de la cámara sobre la posición de inserción se trata del primer paso del proceso (fase 1 de la [Fig. 7-11](#)). Gracias a su uso, el robot se posicionará siempre a la misma distancia respecto del agujero de inserción, independientemente de la orientación de éste o su posicionamiento dentro de la mesa de trabajo (en [video7-4.avi](#) se puede ver la evolución de las características en imagen durante esta fase para la inserción de una barra).

Una vez que se tiene situada la cámara en la posición deseada en la posición de inserción se debe calcular la posición del agujero respecto a la cámara. Esta posición servirá para, mediante traslaciones de los distintos sistemas de referencia, obtener la posición del extremo del robot que permita realizar la inserción. Para obtener esta posición de inserción el robot se debe situar orientando la barra según el eje Z del agujero de inserción. Mediante control visual virtual se obtiene la matriz de parámetros extrínsecos de la cámara (fase 2 de la [Fig. 7-11](#)). Esta matriz proporciona la posición del sistema de referencia del objeto (en este caso el círculo del agujero de inserción) con respecto al sistema de referencia de la cámara. Gracias a esta matriz se puede reconstruir la posición que tendrá el extremo del robot para proceder a la inserción en la dirección correcta. Esta posición se le pasa al robot separándose en el eje de inserción una distancia fija de 5 cm. Esta distancia de seguridad servirá para activar el controlador visual-fuerza en una fase posterior. Este posicionamiento de precisión es siempre un desplazamiento mínimo que, dada la precisión con la que se deben realizar las inserciones, no permite realizar un control visual sin tener en cuenta las fuerzas de interacción en la fase final.

La última fase es la propia de inserción (fase 3 de la [Fig. 7-11](#)). Para ello se activa el control visual-fuerza, dirigiendo la barra al mismo tiempo hacia el agujero de la pieza de ensamblado en la dirección del eje de inserción. Utilizando la técnica descrita en el Apartado 6.2, cualquier contacto con la superficie será detectado con el método de detección de cambios de la superficie descrito en el Apartado 6.2.3, y la trayectoria en imagen que estaba siguiendo el método propuesto en el Capítulo 3 se modifica con uno de los métodos descritos en el Apartado 6.2.2. Finalmente, cuando la lectura de las fuerzas en el eje de inserción de la barra supera un umbral se considera correctamente insertada la barra.



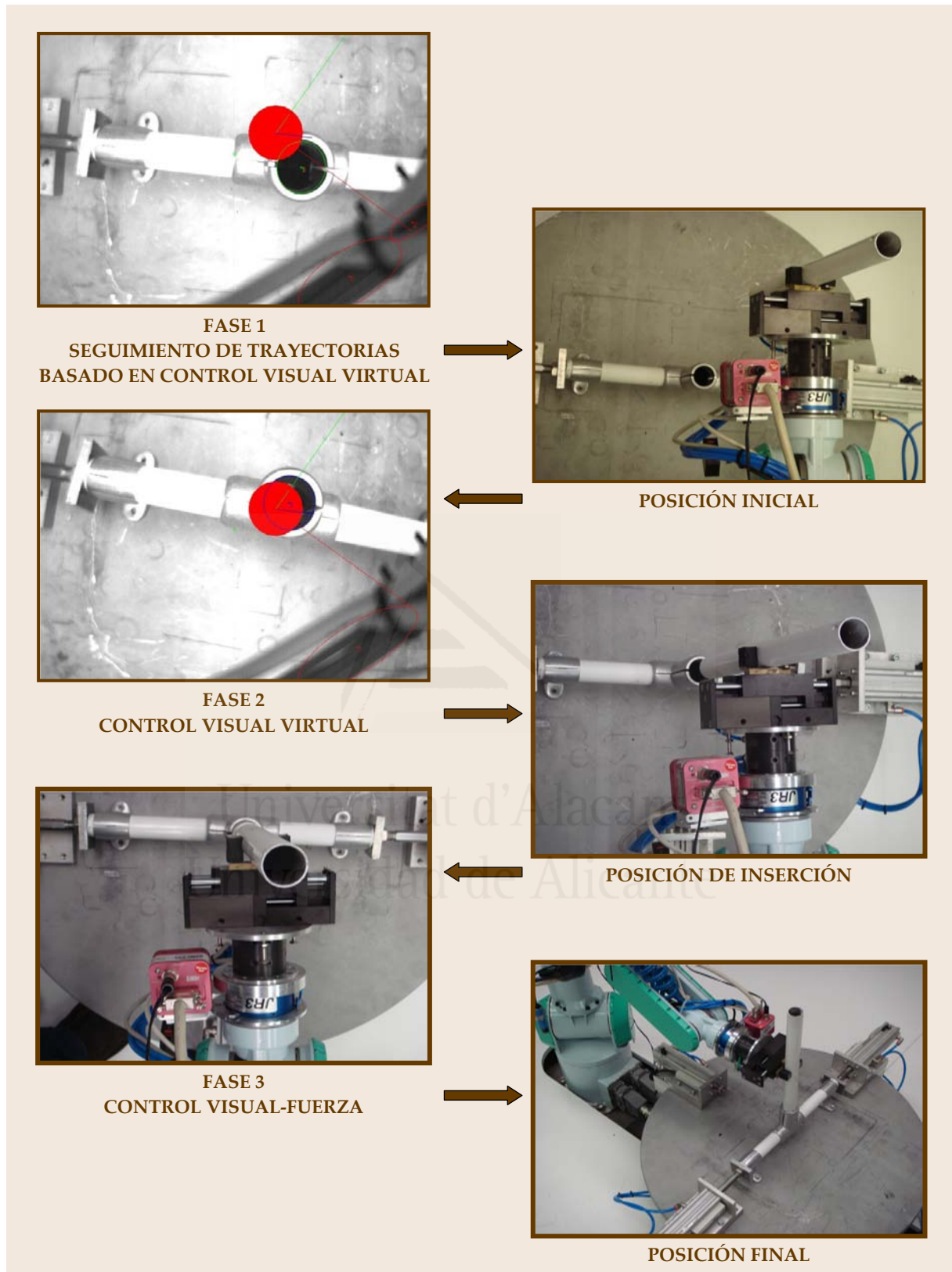


Fig. 7-11 Esquema del proceso de inserción de una barra

La Fig. 7-12 muestra la trayectoria 3-D necesaria para ensamblar una de las barras de la estructura mostrada en la Fig. 7-6.(a). La trayectoria deseada se ha modificado considerando las fuerzas medidas en el extremo del robot (ver Fig. 7-13). De esta forma, el robot es capaz de introducir correctamente la barra en el conector de aluminio.

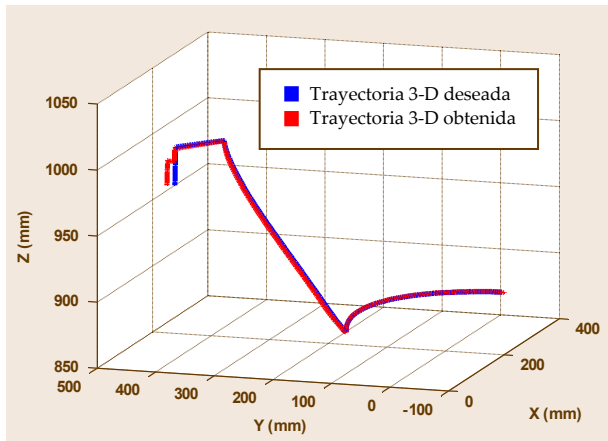


Fig. 7-12 Evolución en el espacio Cartesiano 3-D del extremo del robot durante una tarea de inserción de un tubo de la estructura

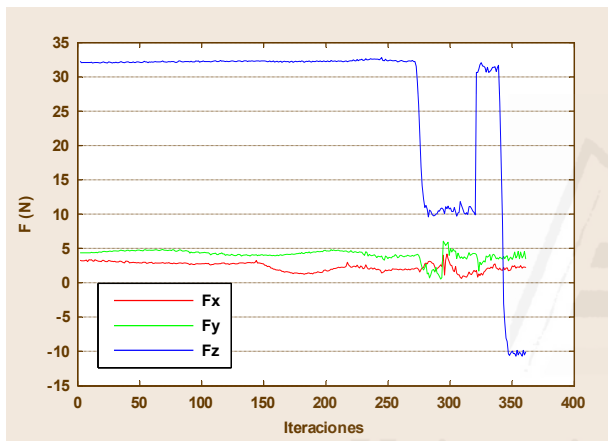


Fig. 7-13 Fuerzas medidas en el extremo del robot durante la tarea de inserción de una barra

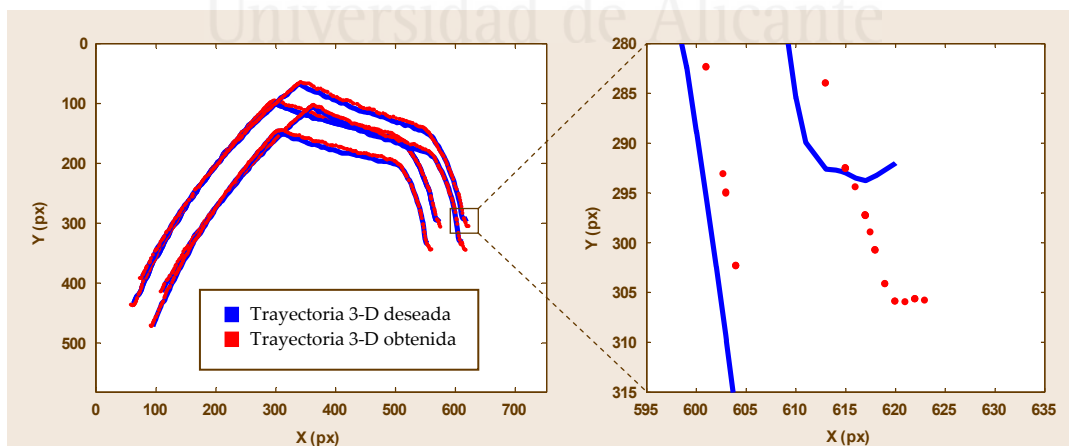


Fig. 7-14 Evolución de las características en la imagen durante la tarea de inserción de una barra. Modificación de la trayectoria a partir de las medidas de fuerzas del extremo

### 7.3.2.2 Tarea 4. Interacción humano-robot

La posición global del operador humano en el espacio de trabajo se obtiene a partir del algoritmo descrito en [Corrales-2008a]. Las medidas obtenidas a partir de los sensores inerciales del sistema de captura de movimientos se utilizan para representar los

La Fig. 7-14 muestra la evolución de las características en la imagen, tanto la deseada, como la modificada por el controlador visual-fuerza descrito en el Capítulo 6. La tarea se completa satisfactoriamente gracias al sistema capaz de modificar la trayectoria deseada en imagen a partir de las fuerzas y pares de contacto (ver Apartado 6.2.2). En esta prueba se ha elegido la estrategia que modifica la trayectoria a partir de la matriz de homografía 2-D (ver Apartado 6.2.2.1). Las fuerzas en el eje Z se regulan a 10 N durante la inserción. Este valor se ha calculado empíricamente para asegurar una correcta inserción. Si el sistema de control visual virtual no consigue posicionar de forma precisa al robot sobre el eje de inserción, esta fuerza deseada permitirá moverse hacia el agujero de inserción manteniendo una fuerza inofensiva para el robot y la estructura. Una vez que la barra entra en el agujero (lo que ocurre cuando desaparecen las medidas del sensor de fuerza distintas al peso de la herramienta y el propio tubo), la inserción se completa cuando las fuerzas en el eje Z son menores que -10 N.

movimientos de las extremidades principales del operador. De esta forma, es posible determinar la posición absoluta de todos los nodos del esqueleto, con lo que cada parte del cuerpo del operador humano se localiza completamente en tiempo real.

Para implementar el comportamiento de interacción humano-robot propuesto, se ha implementado una arquitectura software multi-hilo. La aplicación, programada en C++ se ejecuta en el PC controlador. El controlador del robot, el sistema de captura de movimientos, el sistema de localización UWB y el sistema de visión se conectan a este PC con el objetivo de evitar problemas de sincronización entre las distintas medidas.

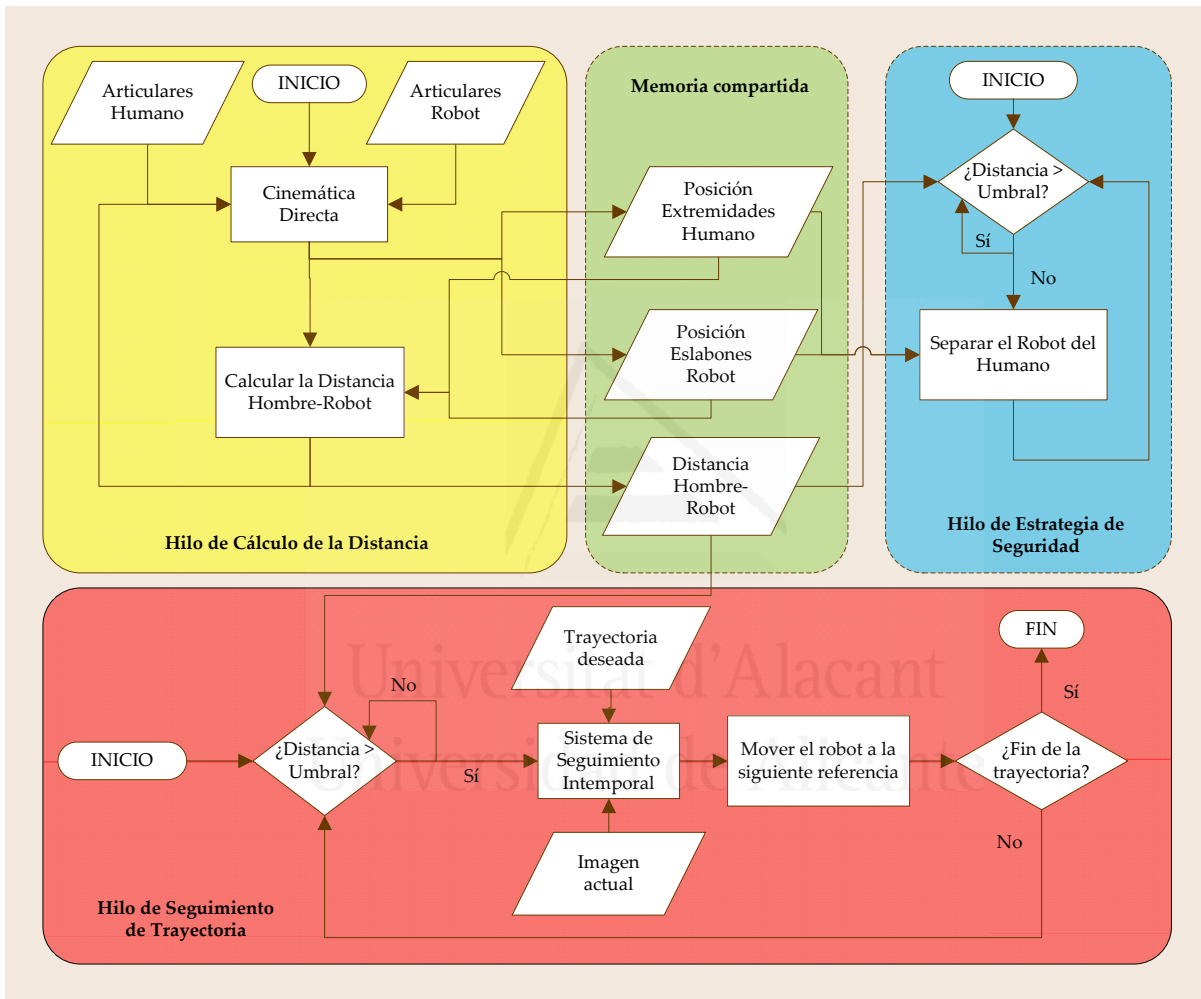


Fig. 7-15 Componentes de la arquitectura software que implementa el comportamiento de seguridad en la interacción humano-robot

La arquitectura software se compone de tres hilos (ver Fig. 7-15): el hilo de cálculo de la distancia, el hilo de seguimiento de trayectorias basado en control visual virtual y el hilo de estrategia de seguridad. Estos tres hilos se ejecutan simultáneamente y comparten un mismo espacio de memoria donde intercambian información. El hilo de cálculo de la distancia obtiene la orientación y posición de las extremidades y el cuerpo del operador humano a partir del sistema de seguimiento formado por el sistema de captura de movimientos y el de localización global por UWB y los ángulos de las articulaciones del robot a partir del controlador del robot. Las posiciones de los eslabones del humano y el robot se calculan a partir de estas medidas utilizando la cinemática directa y se almacenan en el espacio de memoria común. Finalmente, estas posiciones



se utilizan para calcular la mínima distancia entre el operador humano y el robot. El hilo de cálculo de distancia actualiza esta distancia humano-robot cada vez que se registren en el PC controlador nuevas medidas del sistema de seguimiento del humano y el controlador del robot.

La distancia mínima entre el humano y el robot (calculada por el hilo de cálculo de distancia) se almacena en la zona de memoria común, donde los otros dos hilos lo revisan. Por un lado, cuando la distancia humano-robot supera el umbral de seguridad, el hilo de seguimiento de la trayectoria ejecuta el proceso de seguimiento de trayectorias basado en control visual virtual (ver Capítulo 3). El sistema de seguimiento de trayectorias intemporal compara la imagen actual de la cámara montada en el extremo del robot con la referencia deseada de la trayectoria y calcula la velocidad del robot necesaria para hacerlas coincidir. Este proceso de seguimiento termina cuando la trayectoria deseada se completa y se pausa cuando el sistema de seguridad se activa. Por otro lado, cuando la distancia entre el humano y el robot es inferior al umbral de seguridad, el hilo de estrategia de seguridad ejecuta el comportamiento seguro. Este comportamiento seguro consiste en alejar el robot del humano para mantener la distancia humano-robot por encima del umbral de seguridad. Esta trayectoria de escape se calcula a partir de la línea recta que une los dos puntos más cercanos de los dos agentes. Mientras se está ejecutando el comportamiento de seguridad, se pausa el sistema de seguimiento intemporal de trayectorias. Es por ello indispensable que el sistema de seguimiento presente el comportamiento intemporal que se ha descrito a lo largo del Capítulo 3, ya que la pérdida de las referencias temporales debido a la ejecución del comportamiento de seguridad provocaría una incorrecta ejecución de la tarea.

Como se ha comentado anteriormente, tanto el sistema de seguimiento de trayectorias como el sistema de seguridad se ejecutan en el mismo ordenador (Pentium 4 3.2 GHz y 1 GHz RAM) con el objetivo de evitar problemas de sincronización y de intercambiar información de forma más sencilla. El sistema de seguridad se ejecuta a una frecuencia de 30 Hz, la misma frecuencia a la que se actualizan los modelos geométricos del operador humano y el brazo robótico. Así, cada vez que los modelos geométricos se actualizan, el sistema de seguridad calcula la distancia mínima entre todos los volúmenes de seguridad (ver [Corrales-2010] para obtener más información del proceso de actualización on-line de los volúmenes de seguridad) del robot y del humano y verifica si esta diferencia es menor que el umbral de error. Esta frecuencia es suficiente para desarrollar tareas de cooperación humano-robot ya que implica un desplazamiento muy pequeño del robot (3 cm) para cada paso de muestreo cuando el robot se está moviendo a su máxima velocidad (1 m/s). El sistema de seguimiento de trayectorias basado en control visual virtual se ejecuta a una frecuencia de 40 Hz, con lo que el controlador envía al robot una nueva velocidad cada 25 ms.

La Fig. 7-16 muestra la secuencia completa de la tarea de interacción humano-robot. Algunos fotogramas de la secuencia muestran además de la fotografía de la tarea una representación 3-D de los datos de movimiento capturados por el PC controlador (el esqueleto del humano obtenido a partir del sistema de seguimiento del humano y las coordenadas articulares de los robots). La tarea de interacción se puede resumir en las siguientes etapas:

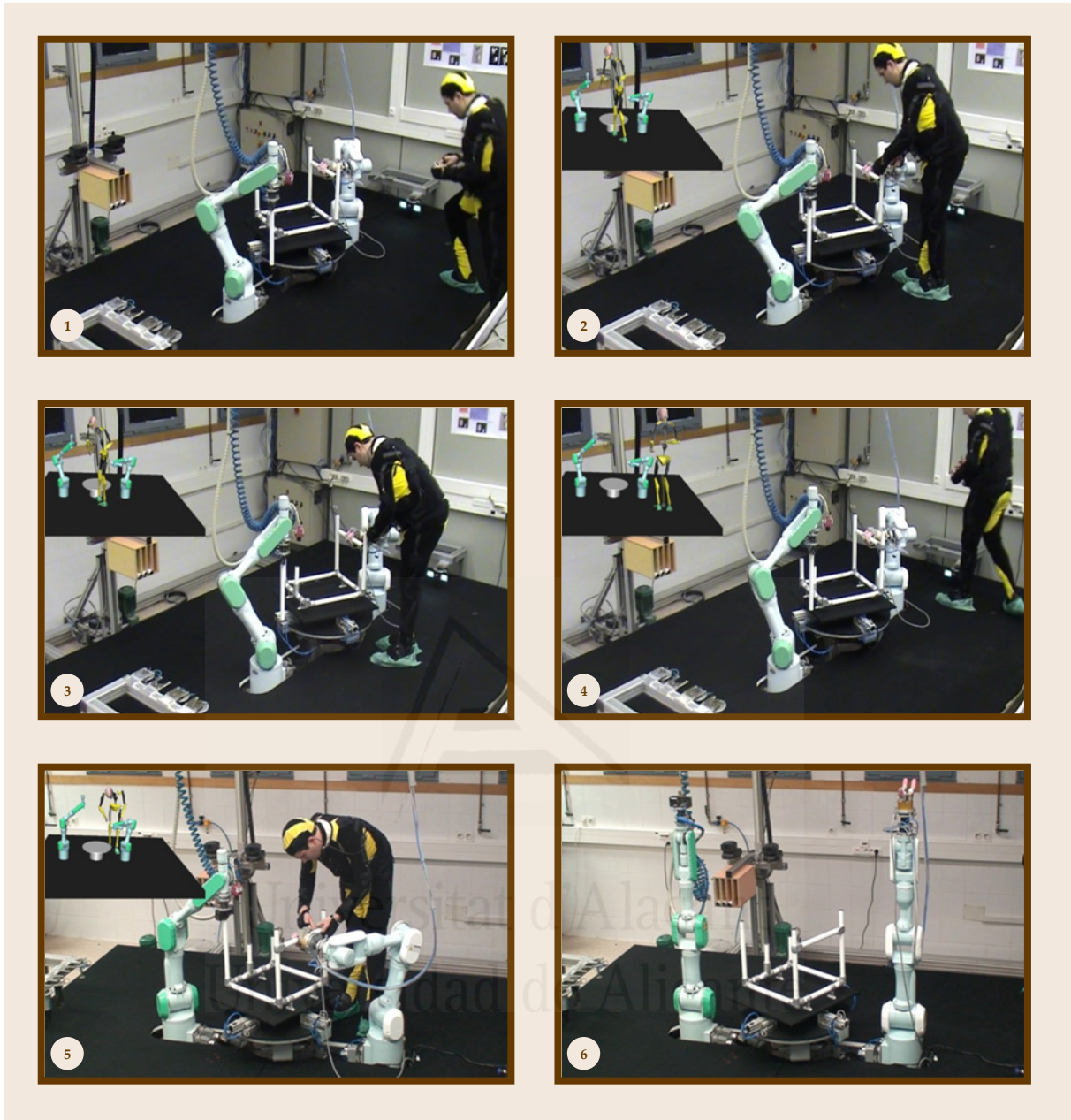


Fig. 7-16 Secuencia de fotogramas de la tarea de colaboración entre dos robots y un operador humano para ensamblar una estructura metálica. En la esquina superior izquierda de los fotogramas 2 a 5 se muestra una representación 3-D de los datos de movimiento procedentes del humano y de los robots.

- Fotograma 1. Uno de los robots,  $R_2$ , está sujetando la barra para que el humano coloque los conectores en T que la sujetarán a la estructura. Mientras, el otro robot,  $R_1$ , está llevando un tubo para insertarlo en la parte opuesta de la estructura.
- Fotogramas 2 y 3: Cuando la distancia entre el operador humano y el robot es menor que el umbral de seguridad, el controlador del robot para la tarea del robot  $R_1$  (que estaba en la fase de inserción del nuevo tubo) y ejecuta el comportamiento de seguridad descrito anteriormente, alejando al robot del humano en la línea recta formado por los nodos más cercanos, para mantener la distancia de seguridad. Mientras el robot  $R_1$  está ejecutando el comportamiento de seguridad, el operador

humano coloca las dos partes del conector en T y las atornilla. Este comportamiento de seguridad no se ejecuta en el robot  $R_2$  porque éste no se mueve mientras sujeta el tubo, y por lo tanto, no hay ningún riesgo de colisión.

- Fotograma 4: Cuando el operador humano termina de ensamblar el primer conector en T y se aleja de la estructura metálica, el robot  $R_1$  abandona la etapa de seguridad y continúa con la tarea pendiente para insertar el tubo en la estructura.
- Fotograma 5: Mientras el operador humano ensambla el segundo conector en T y en el otro extremo del tubo, la estrategia de seguridad no se activa debido a que no se excede el umbral de seguridad. Por lo tanto, el robot  $R_1$  continúa la inserción del tubo mientras el operador humano atornilla el conector en T.
- Fotograma 6: Cuando el operador humano termina de atornillar el conector y el robot termina su tarea, los robots vuelven a la posición de reposo.

## 7.4 Cambio de una bombilla en una farola

En el Apartado anterior se ha mostrado un sistema global para automatizar el montaje de una estructura de aluminio. La presencia de un operador humano hacía necesario un sistema de seguridad que permitiera al humano entrar en la zona de trabajo de los robots sin peligro de colisiones. En este apartado se aplicará este sistema de seguridad a una tarea automatizada de cambio de una bombilla fundida en una farola [GarcíaGJ-2009a, Pomares-2010]. De nuevo, las técnicas propuestas en la presente Tesis permitirán realizar la tarea siguiendo trayectorias seguras, que gracias al comportamiento intemporal del método propuesto en el Capítulo 3, pueden pausarse y reanudarse siempre desde el punto en el que se pararon. La aplicación desarrollada en los siguientes apartados se enmarca también en el proyecto MEC “Diseño, implementación y experimentación de escenarios de manipulación inteligentes para aplicaciones de ensamblado y desensamblado automático (DPI2005-06222)”.

### 7.4.1 Arquitectura del sistema

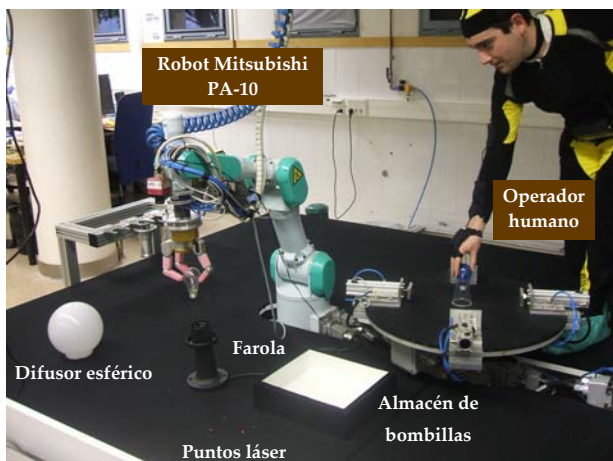


Fig. 7-17 Arquitectura del sistema para el intercambio de una bombilla en una farola

La arquitectura del sistema (ver Fig. 7-17) se compone de un robot Mitsubishi PA-10 de 7 grados de libertad, un operador humano, la farola donde se quiere colocar una bombilla nueva y un almacén de bombillas fundidas. Ambos robots están equipados con un intercambiador de herramientas que permite elegir la herramienta más adecuada durante la tarea (pinzas de dos dedos, mano robótica, destornillador, cámara, ventosa, etc.). El robot Mitsubishi PA-10 tiene instalados tres dispositivos en su extremo para ejecutar la tarea: una mano robótica de tres dedos de Barrett, un sensor



de fuerzas 67M25A-I40 de JR3. Inc. y una cámara en configuración “*eye-in-hand*” PHOTONFOCUS MV-D752-160-CL-8. El sistema de visión es capaz de adquirir y procesar hasta 100 imágenes por segundo usando una resolución de 320x240. Las trayectorias en la imagen se generan a partir de cuatro puntos láser proyectados en el suelo, que serán las características visuales del sistema de seguimiento de trayectorias basado en control visual virtual descrito en el Capítulo 3. El operador humano lleva un traje de captura de movimientos de Animazoo y un sistema de localización basado en tecnología de banda ultra-ancha (UWB) de Ubisense. Estos sistemas se utilizan para poder localizar de forma precisa en tiempo real la posición del humano, así como de sus extremidades y partes principales del cuerpo. Para implementar el algoritmo de colisión, el cuerpo del humano se cubre con 18 volúmenes de seguridad (dos para los pies, dos para las piernas, dos para los muslos, uno para el abdomen, uno para el tórax, uno para el pecho, dos para los hombros, dos para la parte superior del brazo, dos para los antebrazos, dos para las manos, uno para el cuello y otro para la cabeza) (ver Fig. 7-18). El cuerpo del robot se cubre también con 8 volúmenes de seguridad (uno para cada eslabón, incluyendo la base del robot y la herramienta instalada en el extremo).

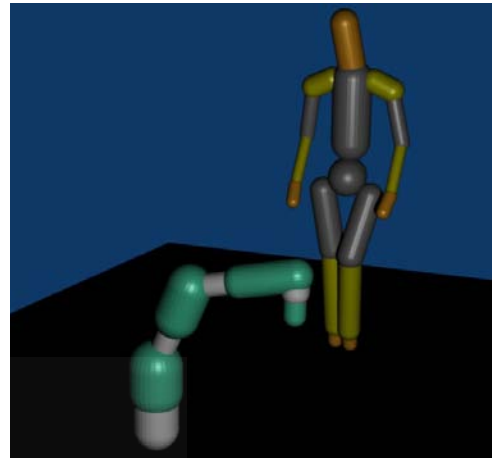


Fig. 7-18 Representación tridimensional de los volúmenes de seguridad que cubren las partes del cuerpo del humano y del robot

#### 7.4.2 Descripción del proceso de cambio de la bombilla

La tarea del cambio de bombilla se puede separar en las siguientes fases (en la Fig. 7-19 se detallan las fases descritas a continuación, y en el vídeo [video7-6.mpg](#) de la carpeta VidCap7 del DVD adjunto se puede ver la secuencia completa del cambio de bombilla):

- Fase 1. El robot manipulador desenrosca el difusor esférico de la farola con el objetivo de tener acceso a la bombilla. Primero, el robot agarra el difusor con la mano de Barrett teniendo en cuenta las fuerzas obtenidas de las galgas extensiométricas de los dedos. Posteriormente, el robot gira el difusor hasta que se libera de la base de la farola. Este momento se identifica por los cambios en el patrón de fuerzas medido por el sensor de fuerzas instalado en el extremo del robot. Finalmente, el robot coge el difusor y lo lleva a una posición fija donde no interfiere con el desarrollo del resto de la tarea (ver Fig. 7-19.(a)).
- Fase 2. A continuación, se desenrosca la bombilla fundida de la base de la farola. Para ello, el manipulador agarra la bombilla con la mano robótica y empieza a girarla hasta que se libera de la base. Este momento se identifica de nuevo a partir de los cambios en las fuerzas y pares medidos por el sensor de fuerza (ver Fig. 7-19.(b)).
- Fase 3. En esta fase el robot lleva la bombilla fundida desde la farola hasta el almacén ejecutando un seguimiento de trayectorias con el sistema descrito en el Capítulo 3 y mejorado en el Capítulo 4 con la calibración multi-imagen. Las

características visuales, como se ha mencionado anteriormente, son cuatro puntos láser proyectados sobre el suelo (ver Fig. 7-19.(c)).

- Fase 4. Mientras el robot lleva la bombilla vieja al almacén (fase 3), el operador humano tiene que dejar una bombilla nueva sobre la mesa para que el robot pueda ponerla posteriormente en la farola (ver Fig. 7-19.(c)). La colaboración del humano es necesaria porque el almacén de las bombillas nuevas queda fuera del espacio de trabajo del robot y porque cada nueva bombilla se debe verificar antes de ser colocada en la farola (tarea muy sencilla para el humano y compleja para el propio robot). Mientras el humano esté dentro del área de trabajo del robot, el sistema de seguridad descrito en el Apartado 7.3.2.2 gestiona el cálculo de la distancia entre las partes del robot y del humano para evitar colisiones. Este sistema de seguridad puede alejar al robot de su trayectoria deseada, sin embargo, el comportamiento intemporal del método de seguimiento le permitirá retomar la trayectoria en el punto en que se quedó.
- Fase 5. El robot coge la bombilla nueva que ha sido verificada por el humano y la lleva a la base de la farola. Esta trayectoria, al igual que todas las trayectorias de desplazamientos largos, se ejecuta usando el sistema de seguimiento propuesto en la presente Tesis. Luego, gira la bombilla hasta que queda fija al casquillo siguiendo el mismo procedimiento que el aplicado en la fase 2. Finalmente, el robot coloca de nuevo el difusor esférico siguiendo el mismo procedimiento que se aplicó en la fase 1 (ver Fig. 7-19.(d)).

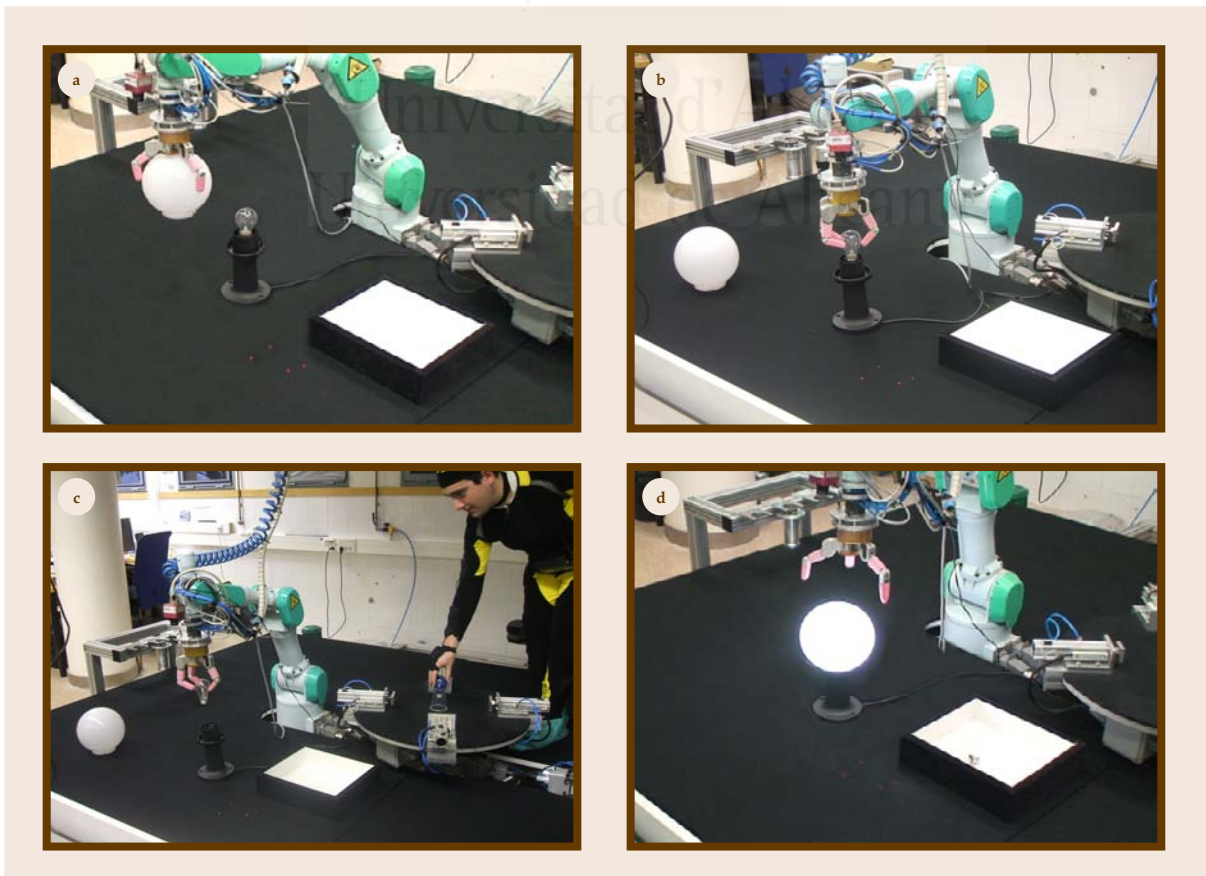


Fig. 7-19 Fases en la tarea de reemplazo de una bombilla (a) Fase 1 (b) Fase 2 (c) Fase 3 (d) Fase 4

Para completar cada una de las tareas se emplea la arquitectura software mostrada en la Fig. 7-15. De esta forma, se tiene un sistema global que guía al robot hacia las distintas posiciones utilizando la información visual proporcionada por la cámara montada en su extremo. Al mismo tiempo, un subsistema de seguridad permite tareas de interacción entre el operador humano y el manipulador robótico. A continuación, se describen de una forma más detallada las técnicas más importantes que se tienen en cuenta para resolver la automatización de esta tarea.

### 7.4.3 Sistema de posicionamiento del brazo robótico

#### 7.4.3.1 Sistema intemporal de seguimiento de trayectorias

El método utilizado para posicionar la cámara sobre los objetos se describe en el Capítulo 3. Este método permite al robot seguir una trayectoria en el espacio imagen. La trayectoria se sigue con un comportamiento intemporal, y de esta forma, cualquier interacción con su entorno no impide el correcto seguimiento de la trayectoria. En las siguientes figuras se muestran distintas trayectorias seguidas por el robot usando el método de seguimiento intemporal de trayectorias basado en control visual virtual. En la Fig. 7-20 se muestra la trayectoria descrita por el extremo del robot en la fase 1, fase en la que se quita el difusor esférico de la farola. La Fig. 7-21 representa la trayectoria 3-D seguida por el robot mientras lleva la bombilla fundida al depósito de bombillas (fase 3). En la fase 5, el robot debe seguir tres trayectorias: la primera trayectoria es para coger la bombilla nueva (Fig. 7-22), que estará situada sobre la mesa giratoria, otra

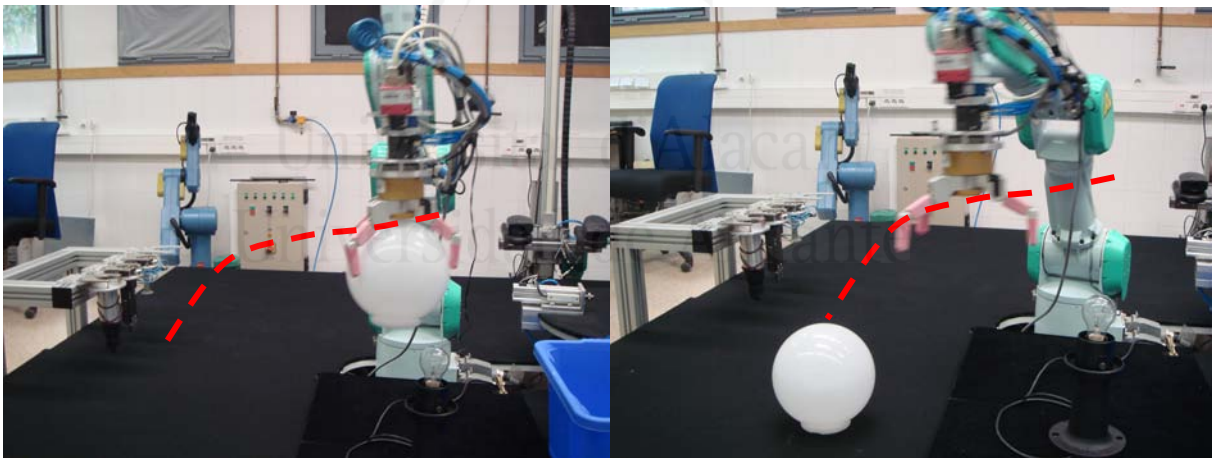


Fig. 7-20 Trayectoria para dejar la caperuza

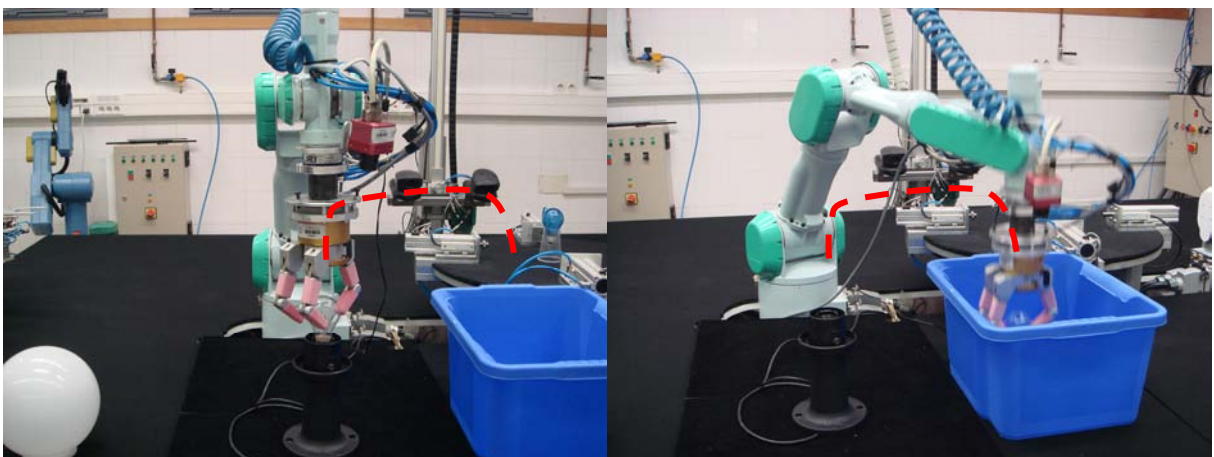


Fig. 7-21 Trayectoria para dejar la bombilla en el depósito



para colocar la nueva bombilla en la lámpara (Fig. 7-23) y la última para colocar el difusor esférico (inversa de la Fig. 7-20).

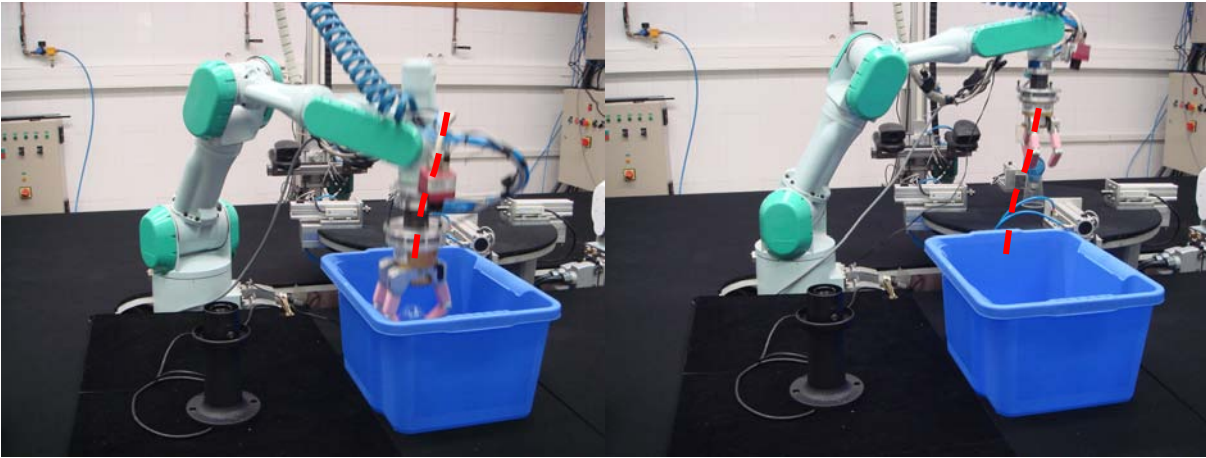


Fig. 7-22 Trayectoria para coger la bombilla nueva



Fig. 7-23 Trayectoria para poner la bombilla nueva en la lámpara

Para demostrar el correcto funcionamiento del sistema propuesto de seguimiento de trayectorias basado en control visual virtual, se muestra a continuación una serie de experimentos relacionados con la trayectoria mostrada en la Fig. 7-21. Esta trayectoria 3-D se corresponde con la trayectoria en imagen representada en la Fig. 7-24. Si no se detecta al humano durante el tiempo que dura la ejecución de esta tarea, el sistema de seguimiento de trayectorias adaptativo funciona normalmente, y el proceso de seguimiento tarda 12 segundos.

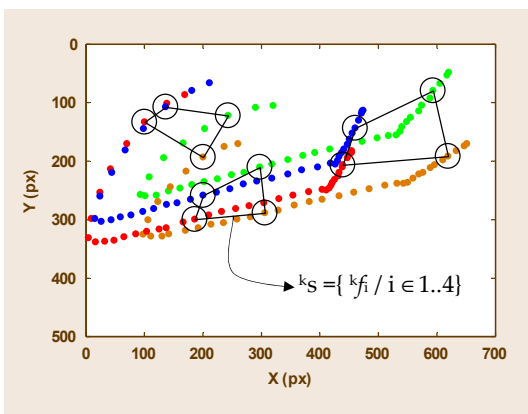


Fig. 7-24 Trayectoria en imagen deseada para depositar la bombilla fundida

Sin embargo, con el objetivo de exponer las diferencias entre el sistema desarrollado y un sistema dependiente del tiempo, la Fig. 7-25 muestra una ejecución de la tarea donde el humano se aproxima al robot reduciendo la distancia humano-robot por debajo del umbral de seguridad, haciendo que la tarea de seguimiento se detenga durante aproximadamente 3 segundos. Mientras el humano está por debajo de esta distancia respecto al

robot, éste último se aleja de la trayectoria deseada para mantener la distancia de seguridad (1 m). Una vez que termina la detección del humano (porque la distancia humano-robot vuelve a superar la distancia de seguridad), el sistema continúa con el seguimiento de la trayectoria a partir de la siguiente referencia en la trayectoria deseada debido a su comportamiento intemporal.

Si se utiliza un sistema de seguimiento dependiente del tiempo, el sistema no será capaz de continuar la trayectoria deseada una vez que el riesgo de colisión con el humano haya desaparecido (ver Fig. 7-26). En este caso, cuando el robot para el seguimiento de la trayectoria por la presencia próxima del humano, el sistema de control visual continúa enviando referencias visuales deseadas al robot a pesar que éste no puede procesarlas debido a la ejecución del hilo de seguridad. Una vez que el humano se retira lo suficiente, las referencias que se han enviado hasta ese momento se habrán perdido. Así, el sistema trata de mantener estas referencias temporales, pero no puede ejecutar el correcto seguimiento de la trayectoria deseada. La Fig. 7-26 muestra distintas trayectorias 3-D de un sistema de seguimiento basado en control visual con comportamiento temporal. En ella se muestran distintos experimentos donde el humano permanece por debajo del umbral de seguridad durante distintos periodos de tiempo. Esta figura muestra claramente cómo el sistema se degrada al aumentar el tiempo de obstrucción de la trayectoria. Sin embargo, empleando el sistema de seguimiento intemporal propuesto en el Capítulo 3 de esta Tesis, el robot continúa correctamente el seguimiento de la trayectoria predefinida, independientemente de la duración de la presencia del operador humano.

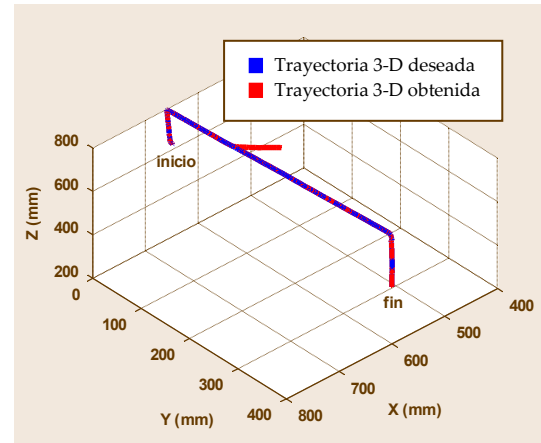


Fig. 7-25 Trayectoria 3-D obtenida con el método intemporal para depositar la bombilla fundida

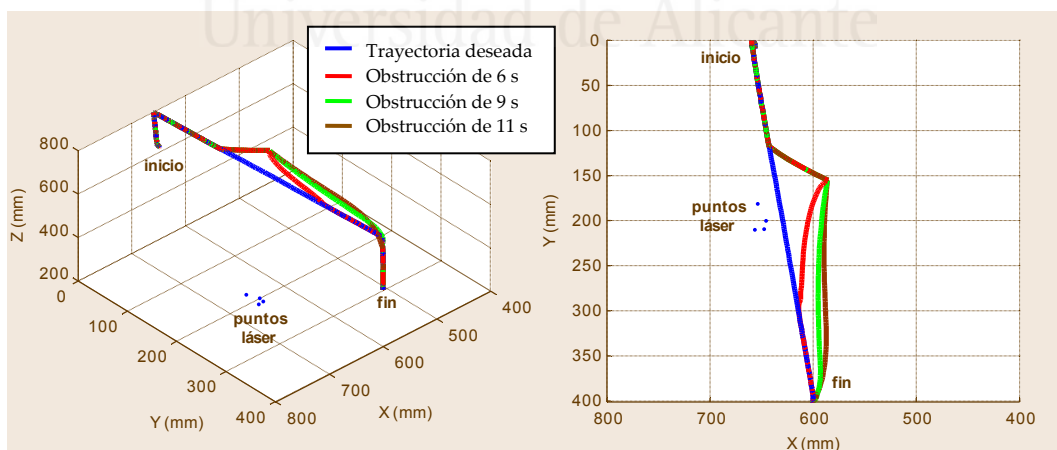


Fig. 7-26 Trayectoria 3-D del extremo del robot obtenida con un método temporal

La Fig. 7-27 muestra la evolución de las características en la imagen para el anterior experimento obtenida con el método intemporal y con un método temporal. El seguimiento funciona perfectamente hasta el momento en el que el hilo de seguridad lo detiene. Sin embargo, cuando el sistema de seguridad devuelve el control al sistema de seguimiento, el sistema con comportamiento temporal no es capaz de volver al punto exacto en la trayectoria donde se produjo la detección del humano.

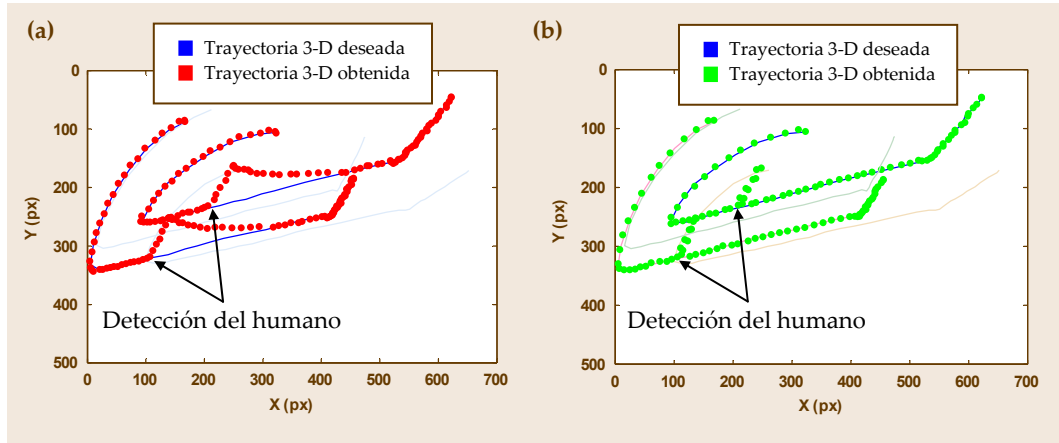


Fig. 7-27 Trayectoria en imagen (a) Método temporal (b) Método intemporal

#### 7.4.3.2 Sistema de posicionamiento preciso con control visual virtual

Una vez que se ha realizado el desplazamiento con un sistema seguro que permite repetir trayectorias libres de obstáculos con control visual, para posicionar la mano sobre el objeto que se quiere coger, se necesita saber de forma precisa la posición del objeto respecto al robot. Para ello, se va a utilizar el control visual virtual. Esta técnica permite reconstruir la posición relativa entre el objeto y la cámara. En el caso que se está estudiando en este experimento, se pretende manipular dos objetos: la caperuza de la lámpara y la bombilla. Para realizar el control visual virtual se necesita tener el modelo 3-D de la lámpara y la bombilla. Se dispone de un sistema de referencia para cada objeto. La obtención de los parámetros extrínsecos permite obtener la relación entre el sistema de referencia del objeto y el sistema de referencia de la cámara. Dado que la relación entre el sistema de referencia de la cámara y el sistema de referencia del extremo del robot es conocida, esta información es suficiente para posicionar la mano de Barrett en el punto preciso en el que se quiere agarrar el objeto.

Para obtener los parámetros extrínsecos mediante control visual virtual es suficiente disponer de una imagen tomada por la cámara real (ver Fig. 7-28). En el caso de la caperuza se proyecta la información de la esfera mediante una cámara virtual con unos parámetros extrínsecos iniciales aleatorios. La ley de control minimizará exponencialmente el error en los extrínsecos tomando como característica deseada la posición de la esfera en la imagen tomada por la cámara real, y variando en cada iteración la posición

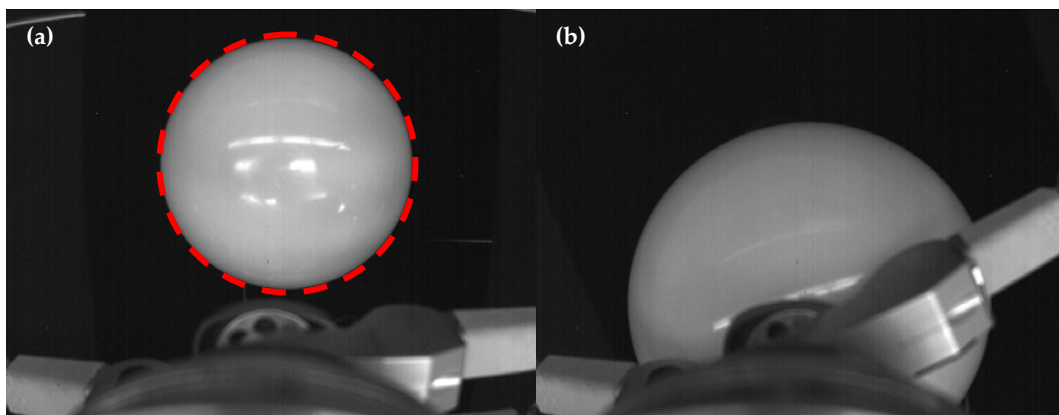


Fig. 7-28 (a) Posición en la que se ejecuta control visual virtual para obtener la posición relativa entre el difusor esférico y la cámara (b) Posición de agarre de la caperuza de la lámpara

de la cámara virtual, y de esta forma, la proyección de la esfera en la imagen.

Para el caso de la bombilla se ha elegido la base de la lámpara, ya que es más fácilmente segmentable. De esta forma, se tiene una elipse como característica deseada en la imagen real (ver Fig. 7-29). De la misma forma que antes, aplicando la ley de control visual virtual, se van variando las posiciones de la cámara virtual (y de esta forma las características actuales) hasta conseguir situar la cámara virtual en la posición en la que las características proyectadas se superponen con las que se observan en la imagen adquirida por la cámara real. La posición de la bombilla se reconstruye al existir una relación fija entre la base de la lámpara y la bombilla (se supone conocida previamente).

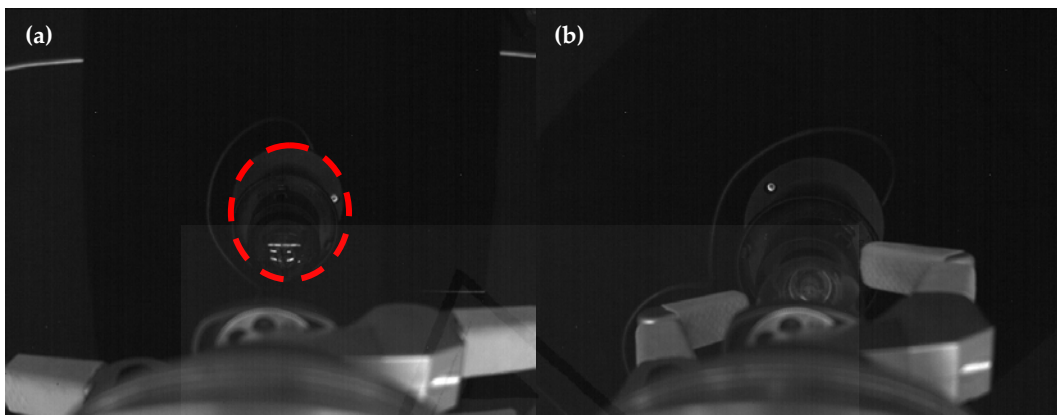


Fig. 7-29 (a) Posición en la que se ejecuta control visual virtual para obtener la posición relativa entre la bombilla y la cámara (b) Posición de agarre de la bombilla en la lámpara

#### 7.4.4 Calibración on-line de la cámara

En el Capítulo 4 se describen los problemas de convergencia encontrados al utilizar una única imagen en la calibración on-line con control visual virtual. Este problema se resuelve utilizando más de una imagen en el proceso de calibración. Así, el sistema de calibración on-line es mucho más robusto al utilizar información de las imágenes obtenidas durante el seguimiento de trayectorias descrito en el Apartado 7.4.3.1. Como se describió en el Capítulo 4, esta mejora en la calibración con control visual virtual, se aplica durante el seguimiento, mejorando el sistema propuesto en el Capítulo 3. Para comprobar que el cálculo on-line de los parámetros intrínsecos es correcto, se muestra a continuación la evolución de los intrínsecos durante el seguimiento de una de las trayectorias. Durante la trayectoria que permite depositar en un lado de la mesa el difusor esférico (ver Fig. 7-20), se realiza zoom con la cámara. Así, se puede realizar un análisis del método de calibración en esta fase donde cambian los parámetros intrínsecos. Inicialmente, los parámetros intrínsecos se corresponden con los valores proporcionados por el fabricante (es decir,  $(f_u, f_v) = (300, 300)$  mm y  $(u_0, v_0) = (160, 120)$  px). Al final de esta fase de la tarea, estos parámetros se estabilizan cuando las coordenadas en píxeles del punto principal son  $(u_0, v_0) = (147.8, 119.9)$  px y la distancia focal en las direcciones  $u$  y  $v$  son  $(390.1, 387.8)$  mm respectivamente. Todos estos valores iniciales se obtienen a partir del método off-line de calibración de Zhang [Zhang-1999].



Se han desarrollado dos experimentos distintos en la fase 1 para comprobar la relación entre el tamaño de la ventana de calibración y la precisión de la calibración obtenida. El primer experimento utiliza 3 imágenes como tamaño de la ventana de calibración,

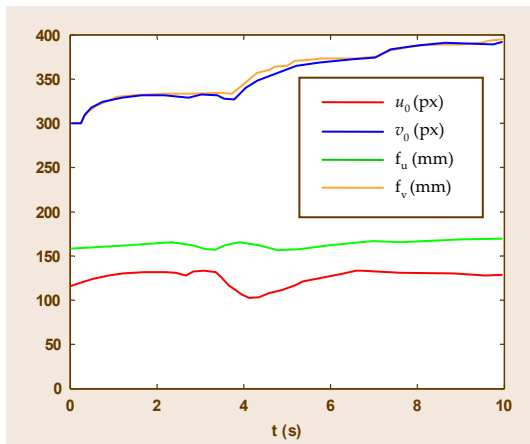


Fig. 7-30 Evolución de los parámetros intrínsecos de la cámara usando una ventana de calibración de 3 imágenes

mientras que el segundo experimento utiliza 6 imágenes. La Fig. 7-30 muestra la evolución de los parámetros intrínsecos estimados de la cámara utilizando la calibración multi-imagen para el primer experimento. Esta evolución presenta cambios bruscos para llegar a la siguiente posición final de los intrínsecos:  $(f_u, f_v) = (395.2, 393.1)$  mm y  $(u_v, v_0) = (170.3, 132.8)$  px. Los parámetros intrínsecos estimados en la posición final de la trayectoria se aproximan con bastante precisión a los obtenidos con una calibración off-line usando el método de calibración de Zhang. Sin embargo, el comportamiento del sistema de calibración se puede mejorar incrementando el tamaño de la ventana de calibración.

La Fig. 7-31 muestra la evolución de los parámetros intrínsecos en el segundo experimento, con una ventana de calibración de 6 imágenes que han sido adquiridas por la cámara situada en el extremo del robot durante el seguimiento basado en control visual virtual. Esta evolución es más progresiva que la evolución obtenida en el primer experimento. Además, los parámetros intrínsecos finales en este experimento  $((u_v, v_0) = (148.1, 120)$  px y  $(f_u, f_v) = (391, 388)$  mm) se aproximan mejor a los valores obtenidos con la calibración off-line que los obtenidos en el experimento anterior. Sin embargo, un tamaño de ventana de calibración muy grande puede introducir retardos y mediar equivocadamente las variaciones de los parámetros en la ventana. Para solucionar este problema y utilizar siempre el tamaño de ventana de calibración adecuado se emplea la técnica descrita en el Apartado 4.3 de esta Tesis.

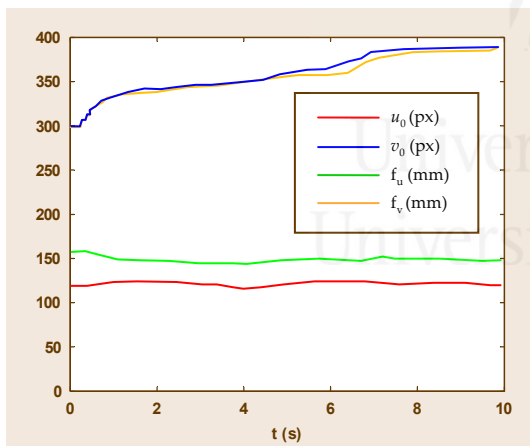


Fig. 7-31 Evolución de los parámetros intrínsecos de la cámara usando una ventana de calibración de 6 imágenes

#### 7.4.5 Detección del humano durante el seguimiento de trayectorias

Como se describe en el Apartado 7.4.2, durante la fase 4 de la tarea de cambio de la bombilla, el operador humano tiene que dejar sobre la mesa giratoria una bombilla nueva. Por lo tanto, el humano necesita entrar en el espacio de trabajo del robot. De acuerdo con el comportamiento de seguridad descrito para la prueba de ensamblado de una estructura metálica (ver Apartado 7.3.2.2 donde se describe la arquitectura software), la presencia del humano en la zona de trabajo del robot aleja al robot de la trayectoria deseada. La Fig. 7-32 muestra la evolución de la distancia entre los volúmenes de seguridad más cercanos del humano y del robot durante la fase 4 de la tarea.

También muestra la evolución del error en el espacio Cartesiano 3-D entre la posición real del extremo del robot durante la tarea y la referencia deseada en la trayectoria 3-D predefinida. Cuando la distancia es inferior al umbral de seguridad (1 m), este error en 3-D aumenta debido a que el robot se está alejando de la trayectoria deseada. El sistema intemporal de seguimiento de trayectorias reduce este error a cero cuando la distancia humano-robot vuelve a ser superior al umbral de seguridad.

#### 7.4.6 Medición de las fuerzas en el extremo para detectar el desenroscado de los distintos elementos

En esta sección se describe la técnica utilizada para comprobar que las piezas se han desenroscado correctamente y pueden ser extraídas para continuar la tarea. Para ello, se utiliza el valor de los pares obtenidos en el extremo del robot. Estos pares se obtienen a partir del sensor de fuerza que el robot tiene situado en su extremo. La misma técnica se utiliza para comprobar que los mismos elementos (difusor esférico y bombilla) están correctamente colocados.

##### 7.4.6.1 Desenroscado del difusor esférico

Al estudiar las gráficas proporcionadas por el sensor de fuerza en el desenroscado de la caperuza, se observa que la componente que filtra el instante en el que la caperuza ha sido desenroscada es el momento en Z. El momento en X presenta varios picos, al igual que el momento en Y, con lo que no se aseguraría el correcto desenroscado de la caperuza si se eligieran estos momentos como referencia. De las distintas pruebas se ha establecido un umbral empírico de 12.5 Nm a partir del cual se puede asegurar que la caperuza ha sido totalmente desenroscada. En la Fig. 7-33 se muestran dos pruebas de

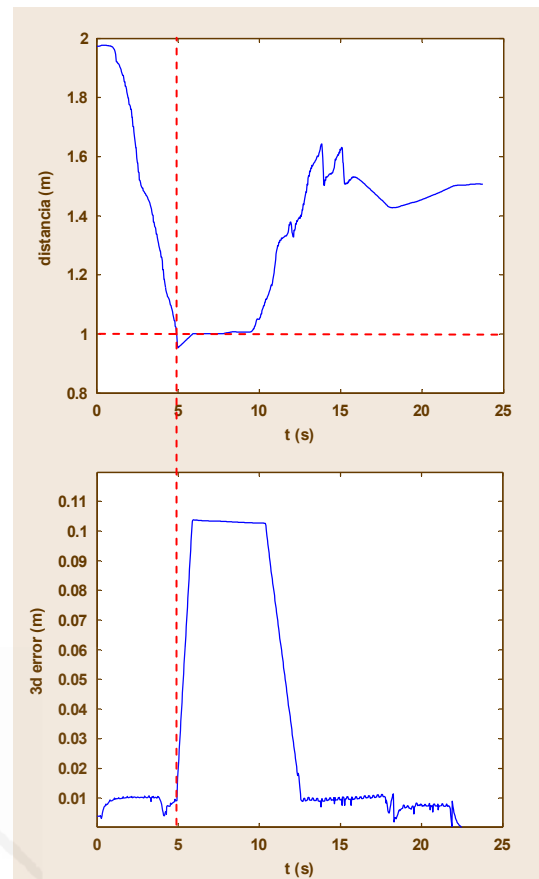


Fig. 7-32 (a) Evolución de la distancia entre el humano y el extremo del robot (b) Error medido entre la trayectoria deseada y la real del extremo del robot

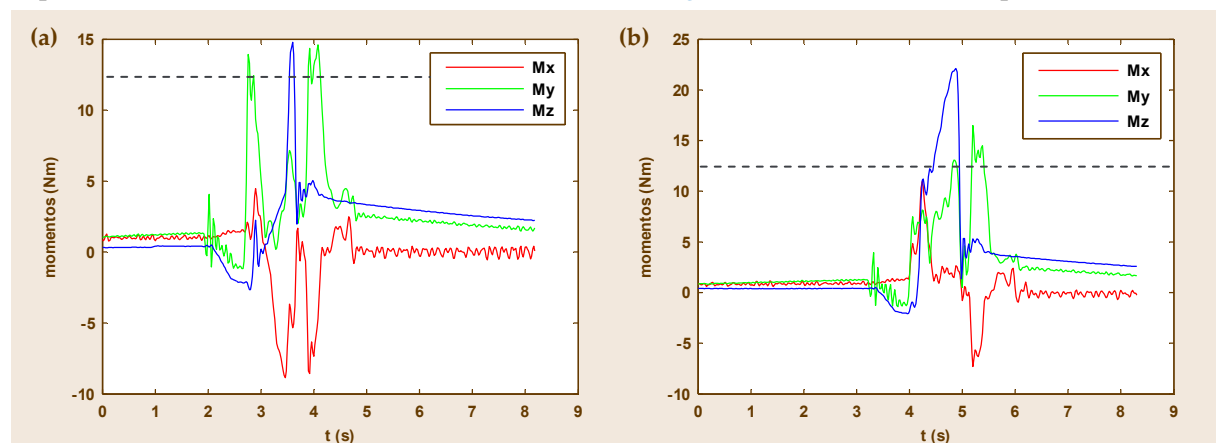


Fig. 7-33 Momentos en el desenroscado del difusor esférico (a) Prueba 1 (b) Prueba 2



desenroscado de la caperuza.

#### 7.4.6.2 Desenroscado de la bombilla

En el caso de la bombilla, y tal como se observa en la Fig. 7-34, la referencia es el momento en X. El momento en Z no varía en los distintos giros de la muñeca. Sin embargo, el momento en Y parece en este caso el más significativo. Se ha optado en este caso por elegir el umbral de  $-2.5$  Nm. A partir de este momento se observa que la bombilla se ha desenroscado y se podría trasladar ya al depósito de bombillas.

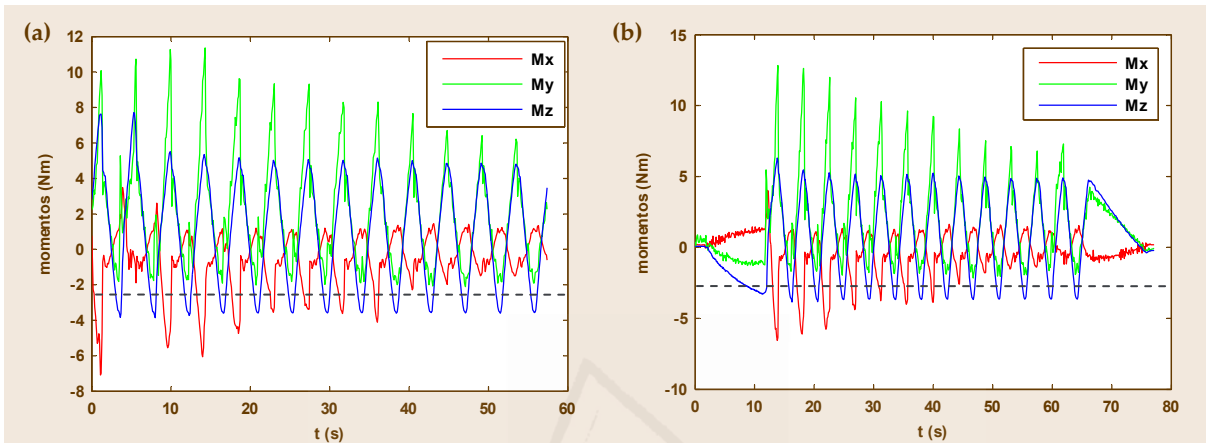


Fig. 7-34 Momentos en el desenroscado de la bombilla (a) Prueba 1 (b) Prueba 2

## 7.5 Desensamblado de una mini-nevera

### 7.5.1 Descripción de la tarea

La última aplicación sobre la que se ha probado el software descrito en el Apartado 7.3.2.2, y que permite realizar tareas de seguimiento de trayectorias predefinidas en la imagen, en tareas de cooperación humano-robot, con un comportamiento seguro es el desensamblado de una mini-nevera [Corrales-2010]. Esta aplicación permite comprobar de nuevo el correcto funcionamiento del método de seguimiento intemporal propuesto en esta Tesis para tareas de cooperación, donde el seguimiento puede pararse en cualquier momento debido a la presencia del humano en el espacio de trabajo.



Fig. 7-35 Arquitectura del sistema para la tarea de desensamblado de la mini-nevera

La Fig. 7-35 muestra los principales componentes que intervienen en esta tarea de desensamblado: la nevera, el manipulador Mitsubishi PA-10 que desatornilla la parte trasera de la nevera, el operador humano que extrae la bandeja interna y el depósito donde se almacenan las distintas partes del frigorífico cuando se quiten de éste. El Mitsubishi PA-10 tiene tres dispositivos instalados en su extremo para ejecutar la tarea: un destornillador, un sensor de fuerzas y pares de JR3 y una cámara PHOTON-FOCUS MV-D752-160-CL-8. Estos elementos ya han sido descritos en las pruebas anteriores. La

trayectoria en la imagen se genera a partir de 4 puntos láser proyectados sobre la tarima. El operador humano lleva de nuevo el traje de captura de movimientos de Animazoo ya descrito en apartados anteriores, junto con un sistema de localización global de Ubisense basado en la tecnología de banda ultra-ancha (UWB). Estos dos sistemas permiten realizar el seguimiento preciso de sus movimientos y calcular la distancia humano-robot para activar la estrategia de seguridad en caso de que sea necesario.

La tarea de desensamblado puede separarse en las siguientes subtareas que deberán ser ejecutadas por el humano y el robot:

- Robot: El manipulador robot tiene que quitar los tornillos de la tapa trasera de la nevera. Primero, el robot va desde el depósito a la posición de desatornillado siguiendo una trayectoria en imagen predefinida. Para ello utiliza el sistema de seguimiento descrito en el Capítulo 3. Posteriormente, el robot desatornilla el tornillo correspondiente y de nuevo el robot es guiado siguiendo una trayectoria segura hasta el depósito para dejarlo allí. Esta tarea se repite hasta que el robot quita todos los tornillos.
- Operador humano: Mientras tanto, el operador humano tiene que ir vaciando el contenido de la mini-nevera.

Las tareas descritas se pueden desarrollar de manera simultánea. Para ello, se emplea el sistema global presentado en el Apartado 7.3.2.2 durante toda la tarea de desensamblado. En la Fig. 7-36 se detalla la secuencia del desensamblado. El sistema de seguimiento de trayectorias con comportamiento intemporal se encarga de guiar al robot desde el almacén de residuos hasta la posición del siguiente tornillo (fotograma 1 de la Fig. 7-36). Durante el seguimiento, el operador humano se aproxima a la nevera para vaciar su contenido (fotograma 2 de la Fig. 7-36). La distancia entre el humano y el robot cae por debajo del umbral de seguridad, activando la estrategia de seguridad. El robot se aleja del humano (fotogramas 3 y 4 de la Fig. 7-36) y se para hasta que la distancia vuelve a superar el umbral de seguridad de nuevo. Mientras, el operador humano abre la puerta de la mini-nevera (fotograma 4 de la Fig. 7-36) y extrae la bandeja interna del frigorífico (fotogramas 5 y 6 de la Fig. 7-36) para llevarla a un almacén que está fuera del entorno de trabajo. Mientras el humano se aleja del robot, la distancia humano-robot vuelve a superar el umbral de seguridad y el sistema de seguimiento con control visual es de nuevo reactivado (fotogramas 7 y 8 de la Fig. 7-36). Gracias a su comportamiento intemporal, la trayectoria se sigue correctamente y el robot puede llegar a la posición de desatornillado siguiendo la trayectoria que tenía predefinida (fotograma 9 de la Fig. 7-36).

### 7.5.2 Necesidad de un sistema de seguimiento intemporal

Para demostrar el correcto funcionamiento del sistema de seguimiento intemporal de trayectorias basado en control visual virtual descrito en el Capítulo 3, se presenta a continuación una comparativa entre este método con comportamiento intemporal y un método con comportamiento temporal. La trayectoria sobre la que se han realizado los experimentos es una trayectoria que permite al robot llegar desde el depósito de objetos hasta una posición cercana a la nevera. En el plano imagen, esta trayectoria es la mostrada en la Fig. 7-37.

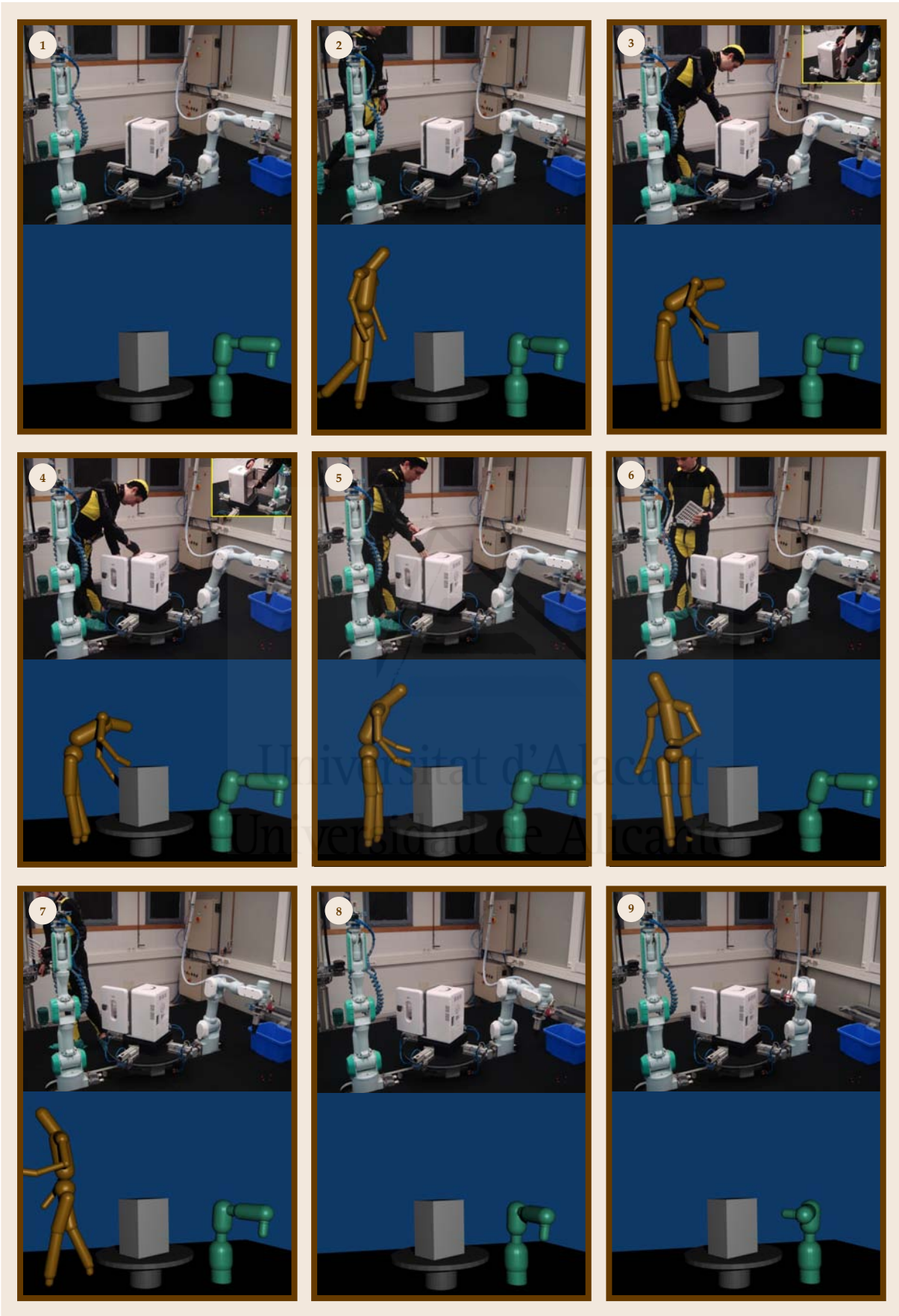


Fig. 7-36 Secuencia de desensamblado con interacción humano-robot. Cada fotograma de la secuencia se muestra con una fotografía del espacio de trabajo y sus correspondientes volúmenes de seguridad

Mediante control visual, el robot debe seguir esta trayectoria en imagen para posicionarse de manera correcta siguiendo una trayectoria en 3-D que evite los posibles obstáculos del espacio de trabajo. Además, seguir una trayectoria en imagen permite mejorar el comportamiento de los sistemas de control visual, al reducir la distancia entre la posición actual y la deseada, con lo que se evitan en mayor grado los mínimos locales. La Fig. 7-38 muestra la evolución de las características en la imagen obtenida con las dos aproximaciones descritas: un método temporal y el método intemporal propuesto en esta Tesis. Los dos métodos ejecutan correctamente el seguimiento hasta el momento en que la obstrucción debido a la entrada del humano comienza. Sin embargo, cuando se libera al robot, el sistema con comportamiento temporal no puede volver al mismo punto en la trayectoria donde el robot tuvo que parar la trayectoria debido a la proximidad del humano. Esto es debido a la pérdida de las referencias temporales. El método propuesto no pierde las referencias mientras el robot está ejecutando la estrategia de seguridad. Si se parara el tiempo en el sistema temporal no se resolvería el problema, ya que, cuando la estrategia de seguridad finalice, la siguiente referencia sería la siguiente muestra en la trayectoria deseada. Pero antes de que el robot llegara a ese punto el sistema temporal ya estaría dando la siguiente referencia. Con estos sistemas temporales no se consigue repetir la trayectoria que se deseaba.

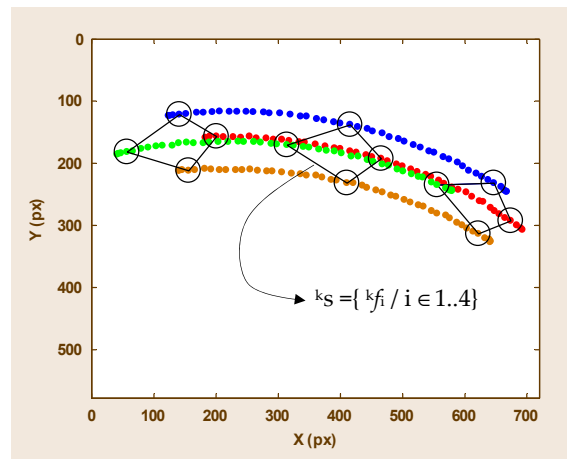


Fig. 7-37 Trayectoria deseada en imagen para desplazamientos entre el depósito de objetos y la mini-nevera

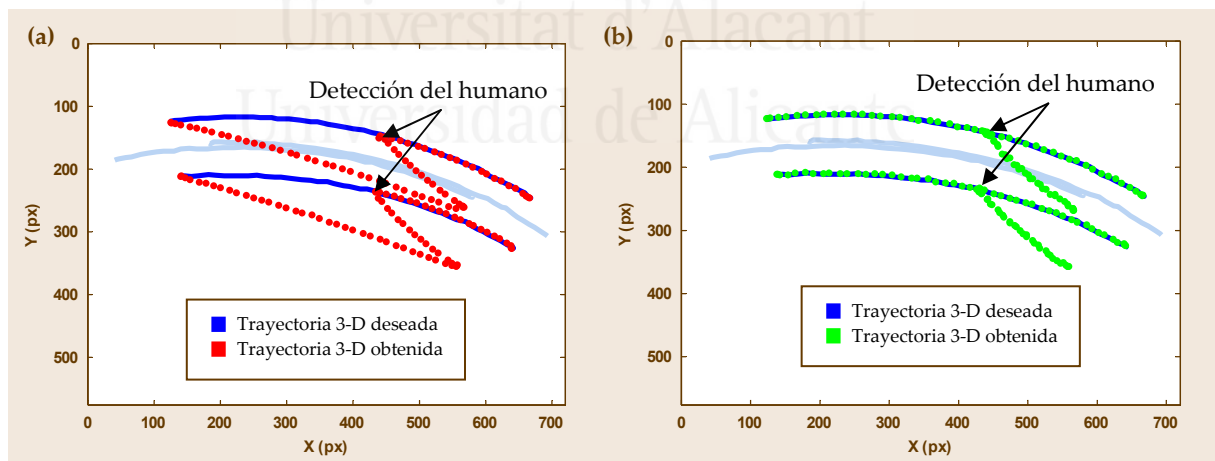


Fig. 7-38 Evolución de las características en el espacio imagen usando un sistema con comportamiento: (a) temporal (b) intemporal

La Fig. 7-39 muestra la evolución de la distancia mínima entre el humano y el robot obtenida por el algoritmo de cálculo de distancia para la tarea de desensamblado de la nevera. Esta gráfica muestra cómo se aproxima el humano al robot mientras éste último ejecuta el seguimiento de la trayectoria deseada desde la iteración 1 a la 289. En la iteración 290 comienza la estrategia de seguridad y el controlador del robot pausa el seguimiento de la trayectoria. La estrategia de seguridad se ejecuta desde la iteración 290 a la iteración 449 e intenta mantener la distancia humano-robot por encima de un



umbral de seguridad (0.5 m). En la iteración 450, el controlador del robot reactiva el seguimiento de la trayectoria porque la distancia humano-robot vuelve a ser superior al umbral cuando el humano se aleja del espacio de trabajo del robot.

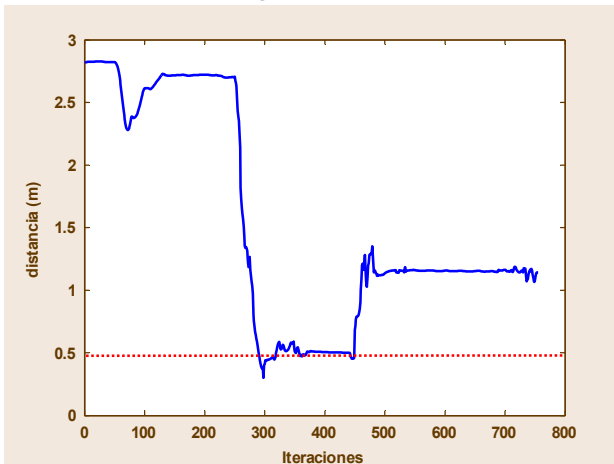


Fig. 7-39 Evolución de la distancia humano-robot mínima durante la tarea de desensamblado

De nuevo, en esta prueba se hace patente la necesidad de incorporar un sistema con comportamiento intemporal para permitir tareas de interacción humano-robot. El sistema propuesto es capaz de parar la tarea de seguimiento para realizar un alejamiento de seguridad y volver al punto en que se dejó el seguimiento una vez que la distancia vuelve a ser segura.

## 7.6 Conclusiones

Las aplicaciones que se han descrito en este Capítulo justifican el planteamiento de un método de seguimiento intemporal de trayectorias para tareas de interacción humano-robot. Gracias a este comportamiento intemporal, se puede realizar el guiado de los robots manipuladores siguiendo una trayectoria previamente definida. Todas las aplicaciones detalladas en este Capítulo se enmarcan dentro del proyecto MEC DPI2005-06222. El principal objetivo del proyecto es el de diseñar, implementar y experimentar escenarios de manipulación inteligente para aplicaciones de ensamblado y desensamblado automático. Es por ello que las aplicaciones tratan de resolver distintos problemas de ensamblado o desensamblado.

Dentro de cada aplicación se requieren distintas técnicas para conseguir automatizar los procesos. En todas ellas, hay un elemento común, que es la posibilidad de que un operador humano aparezca en el espacio de trabajo de los robots. El software implementado dispone de varios hilos que se ejecutan en paralelo. En concreto, un hilo se encarga del control del robot, implementando el sistema de seguimiento de trayectorias basado en control visual virtual propuesto en el Capítulo 3 y mejorado con la calibración multi-imagen en el Capítulo 4, junto con el sistema de modificación de la trayectoria en función de la fuerza de interacción descrito en el Capítulo 6. También se incluyen en este hilo de control del robot los esquemas descritos en el Capítulo 6 para detectar un cambio en la superficie a partir de las fuerzas de interacción, así como el esquema de impedancia realimentado con el sistema de seguimiento de trayectorias. Al mismo tiempo, otro hilo se encarga de calcular la distancia entre el humano y el robot. La estrategia de seguridad elegida separa al robot en línea recta desde la posición en la que la distancia es menor que el umbral de seguridad, hasta que la distancia se mantiene justo en ese umbral. Cuando la distancia vuelve a superar el umbral el robot se libera y continúa con la tarea que estaba realizando. Si estaba realizando un seguimiento de alguna trayectoria, gracias al comportamiento intemporal de la aproximación propuesta, la trayectoria se seguirá desde el punto en el que se dejó.

# Conclusion

## 8 Conclusiones

En este último Capítulo se describen las conclusiones más destacadas acerca de las investigaciones desarrolladas y presentadas a lo largo de la presente Tesis. Los principales resultados alcanzados con estas investigaciones se han ido publicando en distintos medios científicos. En el Capítulo se describen brevemente las principales aportaciones realizadas en cada uno de ellos. Por último, se ofrecen diversas ideas para mejorar los distintos esquemas de control propuestos. Se exponen los distintos trabajos futuros que permitirán aplicar

8.1	<b>Conclusiones</b> .....	225
8.2	<b>Publicaciones</b> .....	227
8.2.1	Revistas impactadas .....	227
8.2.2	Capítulos de libro y revistas no impactadas .....	229
8.2.3	Congresos internacionales .....	230
8.2.4	Congresos nacionales .....	232
8.3	<b>Trabajos futuros</b> .....	233

entre otras cosas los esquemas de control visual directo presentados en esta Tesis a un robot real que actualmente está en fase de diseño y construcción.

### 8.1 Conclusiones

Las investigaciones realizadas sobre diversos sistemas de control visual basado en imagen han permitido observar la imposibilidad de esta aproximación para ejecutar tareas de posicionamiento preciso siguiendo una trayectoria 3-D deseada. Existen en la literatura varios esquemas de control basados en visión para realizar el seguimiento de trayectorias predefinidas. La mayoría de ellas presenta un comportamiento temporal, aspecto que las hace inadecuadas para tareas de interacción con el entorno, ya sea con otros objetos o con otros agentes que entren en el espacio de trabajo del robot.

La principal aportación de esta Tesis es un nuevo sistema de seguimiento de trayectorias en el espacio imagen. Este sistema aporta una serie de mejoras respecto a los métodos de seguimiento en imagen propuestos hasta la fecha. En primer lugar, presenta un comportamiento intemporal. Esta propiedad es vital en la posterior fusión del sistema con información de fuerza para permitir obtener un controlador capaz de interactuar con el entorno. En segundo lugar, se trata de un sistema que es capaz de mantener una velocidad constante durante el seguimiento de la trayectoria. Los métodos intemporales definidos hasta ahora no permiten ajustar de manera constante esta velocidad, lo que hace que no sean válidos en aplicaciones en las que sea crucial mantener esta velocidad constante para abordar con éxito la tarea. Gracias a esta última característica, se consigue obtener un resultado en imagen y en 3D mucho menos oscilante que el obtenido con sistemas intemporales previos. Además, el método propuesto permite realizar el seguimiento a partir del conjunto de características visuales, asegurando en todo momento que se tiene una posición 3-D válida del robot durante la tarea de seguimiento. Para conseguir esto último se propone el uso de control visual virtual



para calcular la posición 3-D de la cámara respecto del objeto, es decir, los parámetros extrínsecos. Sin embargo, empleando control visual virtual con una única imagen no es posible obtener precisión en la calibración de los parámetros intrínsecos. Por ello, se ha propuesto un método llamado calibración multi-imagen que permite a partir de más de una imagen obtener de forma precisa los parámetros intrínsecos de la cámara. También se propone un método para actualizar on-line el número de imágenes necesarias para obtener una estimación de los parámetros intrínsecos internos sin sobrecargar el sistema. De esta forma, se han ampliado las características del método de seguimiento propuesto aportándole la posibilidad de obtener on-line el valor de los parámetros intrínsecos necesarios en el cálculo de la matriz de interacción que se utiliza en la ley de control.

Los trabajos encontrados acerca de control visual directo en la literatura no tratan en ningún caso el problema del seguimiento de trayectorias en el espacio imagen. En este aspecto, en el Capítulo 5 se presenta otra aportación de esta Tesis, al desarrollar tres métodos distintos de seguimiento de trayectorias utilizando control visual directo. Además, los tres métodos presentan un comportamiento intemporal, ya que la siguiente referencia dentro de la trayectoria se calcula a partir de la posición actual de la cámara y no del tiempo transcurrido desde el inicio del seguimiento. Estos métodos se han probado en un robot de dos grados de libertad en simulación. La simulación se ha realizado sobre la base de un primer prototipo de un robot real que se construirá bajo la financiación del proyecto del MCYT "Manipulación inteligente mediante percepción háptica y control visual empleando una estructura articular ubicada en el robot manipulador (DPI2008-02647)". El primero de los métodos propuestos no permite realizar un control de la velocidad de seguimiento, aunque sí que garantiza movimientos continuos del robot a lo largo de la trayectoria evitando parar en cada referencia de la trayectoria deseada. Evolucionado a partir de este primer método de seguimiento con control visual dinámico se propone un método que permite garantizar una velocidad mínima de seguimiento. Por último, a partir de este método y utilizando el esquema del método de seguimiento para control visual indirecto, se presenta un método de seguimiento intemporal que proporciona los pares y fuerzas necesarios para guiar al robot a lo largo de la trayectoria deseada y manteniendo una velocidad deseada constante. Como se ha mencionado anteriormente, no existe en la literatura ningún otro método de seguimiento para control visual directo.

Los sistemas de control visual-fuerza hacen posible la interacción con el entorno mientras se posiciona el robot siguiendo una trayectoria predefinida. La mayoría de los desarrollos existentes hasta la actualidad para la combinación de ambas informaciones sensoriales emplean estrategias híbridas en las que el entorno es perfectamente conocido y se realiza una división del espacio de trabajo en direcciones controladas por visión y direcciones controladas por fuerza. Las aportaciones descritas en la presente Tesis sobre control visual-fuerza se centran en el esquema de control de impedancia. A partir del esquema clásico de control de impedancia, se substituye la velocidad de referencia del controlador de posición por la velocidad de referencia del sistema de seguimiento descrito en el Capítulo 3. Cuando el extremo del robot entra en contacto con una superficie, la trayectoria deseada en imagen debe ser modificada de forma que se eviten acciones de control contradictorias entre la dirección de movimiento que indica el control de fuerza y la dirección de movimiento que indica el controlador visual. Para resolver

este problema se proponen dos sistemas novedosos que replanifican la trayectoria en imagen a partir de las fuerzas de interacción medidas por el sensor de fuerzas. La primera utiliza la matriz de homografía 2-D para obtener una nueva trayectoria en imagen a partir de la reconstrucción del movimiento de la cámara. Esto se consigue de manera independiente a errores en la estimación de los parámetros intrínsecos de la cámara. La segunda aproximación hace uso de la matriz que relaciona directamente las variaciones de las características en el espacio imagen con las variaciones de las fuerzas de interacción. Con la estimación de esta matriz se consigue una modificación de la trayectoria que no requiere conocimiento previo ni de la cinemática del robot, ni de la calibración de la cámara, ni de la calibración previa entre el sensor de fuerza y la cámara. La última aportación para mejorar los sistemas de control visual-fuerza está relacionada con un sistema que mejora la detección de cambios en la superficie con la que se está interactuando. Cuando el robot está siguiendo una trayectoria en imagen a la vez que está en contacto con una superficie, cualquier cambio en la curvatura de esta superficie requerirá replanificar la trayectoria con cualquiera de los métodos propuestos en esta Tesis para tal fin. Encontrar el punto exacto en el que sucede este cambio de la normal a la superficie es por tanto crucial en el correcto funcionamiento de los sistemas de control visual-fuerza.

Los resultados mostrados en el Capítulo 7 permiten comprobar el correcto funcionamiento de los sistemas propuestos. Estos sistemas permiten realizar tareas de ensamblado y desensamblado automático en cooperación con operadores humanos. El controlador del robot permite realizar tareas precisas de seguimiento de trayectorias predefinidas, tareas de posicionamiento preciso gracias al control visual virtual o tareas precisas de interacción donde se controle la posición del robot con visión y fuerza de forma simultánea.

## 8.2 Publicaciones

Seguidamente se citan las distintas publicaciones generadas a partir de las investigaciones presentadas en esta Tesis, desglosadas entre 6 artículos en revistas impactadas, 5 artículos en capítulos de libro y revistas no impactadas, 8 aportaciones a congresos internacionales y 6 a congresos nacionales.

### 8.2.1 Revistas impactadas

- **“Safe Human-Robot Cooperation Based on an Adaptive Time-Independent Image Path Tracker”**. Pomares, J.; Candelas, F. A.; Torres, F.; Corrales, J. A.; Garcia, G. J., *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, 6(8), Aceptado (Fecha prevista de publicación: Agosto 2010).

El artículo describe las mejoras introducidas en el sistema de seguimiento intemporal basado en control visual virtual al añadirle la calibración multi-imagen que permite tener siempre una estimación precisa de los parámetros intrínsecos de la cámara. Además, se realiza un estudio de la estabilidad del método de seguimiento y se aplica a tareas de cooperación humano-robot.

- **“Survey of Visual and Force/Tactile Control of Robots for Physical Interaction in Spain”**. Garcia, G. J.; Corrales, J. A.; Pomares, J.; Torres, F., *Sensors*, 9(12) pp. 9689-9733, 2009.

Este artículo se trata de un artículo de revisión. Fruto de las investigaciones realizadas para establecer el estado del arte de los sistemas de control visual y de fuerza, se describen las principales aportaciones realizadas por los grupos de investigación españoles en estos campos.

- **“A Cooperative Robotic System Based on Multiple Sensors to Construct Metallic Structures”**. Gil, P.; Pomares, J.; Puente, S. T.; Candelas, F.; Garcia, G. J.; Corrales, J. A.; Torres, F., *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 45(5) pp. 616-630, 2009.

Entre las técnicas utilizadas para el montaje de una estructura metálica destaca el uso del sistema de seguimiento de trayectorias propuesto en el Capítulo 3 de esta Tesis. El empleo de este sistema de seguimiento resulta crucial para ejecutar correctamente la tarea en presencia del humano debido a su carácter intemporal.

- **“Automatic Robotic Tasks in Unstructured Environments Using an Image Path Tracker”**. Garcia, G. J.; Pomares, J.; Torres, F., *Control Engineering Practice*, 17(5) pp. 597-608, 2009.

Este trabajo presenta el método de seguimiento intemporal de trayectorias basado en control visual virtual. Se realizan comparativas entre el método propuesto y otros métodos con carácter temporal. También se compara con el control visual basado en flujo de movimiento.

- **“Improving Detection of Surface Discontinuities in Visual-Force Control Systems”**. Pomares, J.; Gil, P.; Garcia, G. J.; Sebastián, J. M.; Torres, F., *Image and Vision Computing*, 26(10) pp. 1435-1447, 2008.

En este artículo se describe un método que fusiona información de fuerza y de luz estructurada para detectar posibles cambios en la superficie con la que el robot está interactuando. Mediante patrones de luz se consigue una línea que marca un posible cambio en la superficie. El movimiento virtual de la posible línea de discontinuidad aportada por la luz estructurada permite afinar el momento en el que activar el detector basado en fuerza. De esta forma se evitan las detecciones falsas.

- **“A Robust Approach to Control Robot Manipulators by Fusing Visual and Force Information”**. Pomares, J.; Garcia, G.J.; Torres, F. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*. Vol. 48. Num. 4. Pp. 437-456. 2007.

El artículo muestra un sistema de control visual-fuerza para controlar el movimiento de un robot. La trayectoria deseada en la imagen se modifica a partir de la información del sensor de fuerza utilizando la matriz de homografía.

Además, este método es robusto ante errores en la estimación de los parámetros intrínsecos.

### 8.2.2 Capítulos de libro y revistas no impactadas

- **“Safe Cooperation between Human Operators and Visually Controlled Industrial Manipulators”**. Corrales, J. A.; Garcia, G. J.; Candelas, F.; Pomares, J.; Torres, F., En *Advances in Human-Robot Interaction*, A. Lazinec, Ed. In-Tech Press: Vukovar, Croatia, Aceptado (Fecha prevista de publicación: 2010).

En este capítulo de libro se describe la arquitectura software del sistema empleado para la interacción humano-robot en tareas de seguimiento de trayectorias. Se mejora el cálculo de la distancia entre el operador humano y el robot y se remarca la necesidad de controlar el robot mediante un sistema con un comportamiento intemporal, que permita seguir ejecutando la tarea en el punto en el que se detuvo debido a la puesta en marcha de la estrategia de seguridad.

- **“Using Visual and Force Information in Robot-Robot Cooperation to Build Metallic Structures”**. Pomares, J.; Gil, P.; Corrales, J. A.; Garcia, G. J.; Puente, S. T.; Torres, F., *Journal of Automation, Mobile, Robotics & Intelligent Systems*, 3(3) pp. 96-101, 2009.

En este artículo se describe el sistema desarrollado para el montaje automático de una estructura metálica. Para ensamblar las distintas piezas de la estructura se utilizan los sistemas de control descritos en la presente Tesis, como el control de impedancia realimentado con el sistema de seguimiento intemporal basado en control visual virtual o el sistema de modificación de la trayectoria basado en la matriz de interacción fuerza-imagen.

- **“Image Motion Estimator to Track Trajectories Specified with respect to Moving Objects”**. Pomares, J.; García, G.J.; Payá, L.; Torres, F. En *Informatics in Control Automation and Robotics*, J. A. Cetto, J.-L. Ferrier, J. M. Costa y J. Filipe, Eds.; Springer-Verlag: Berlin, 2008; pp. 207-217.

En tareas de control visual en las que se debe seguir un objeto en movimiento se necesita estimar este movimiento del objeto de alguna forma para evitar que el error se mantenga durante todo el seguimiento. Para estimar el movimiento del objeto, es necesario calcular la velocidad de la cámara en la iteración anterior de la tarea de control visual. En este artículo se presenta una técnica para calcular esta velocidad.

- **“An Uncalibrated Approach to Track Trajectories using Visual-Force Control”**. Pomares, J.; García, G.J.; Payá, L.; Torres, F. En *Informatics in Control, Automation and Robotics II*, J. Filipe, J.-L. Ferrier, J. A. Cetto y M. Carvalho, Eds.; Springer: Dordrecht, 2007; pp. 103-108.

El control de impedancia permite controlar las fuerzas de interacción mientras se utiliza un controlador de posición. En el presente artículo se reali-

menta con información visual al reemplazar el controlador de posición por un control visual basado en flujo de movimiento.

- **“Adaptive Visual Servoing and Force Control Fusion to Track Surfaces”**. Pomares, J.; García, G.J.; Payá, L.; Torres, F. Ed. WSEAS Transactions on Systems. Vol. 5. Num. 1. pp. 25-32. 2006.

En este artículo se presenta un método de fusión de control visual-fuerza. El controlador visual propuesto presenta un comportamiento intemporal, y además es autocalibrado, de forma que es capaz de obtener los parámetros intrínsecos durante la tarea. Su fusión con un control de impedancia permite obtener el control visual-fuerza propuesto.

### 8.2.3 Congresos Internacionales

- **“Visual Servoing Path Tracking for Safe Human-Robot Interaction”**, Garcia, G. J.; Corrales, J. A.; Pomares, J.; Candelas, F. A.; Torres, F., En Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics, Malaga, Spain, Abril 2009; pp. 672-678.

En este artículo se presenta el sistema global que permite realizar tareas cooperativas entre el robot y el humano. Con este sistema se ejecutan tareas de seguimiento de trayectorias que pueden ser interrumpidas por la estrategia de seguridad para evitar colisiones entre el robot y el humano. Gracias al comportamiento intemporal del método de seguimiento, las trayectorias son siempre terminadas de manera completa.

- **“Intelligent Robotic Multisensorial System to Build Metallic Structures”**, Corrales, J. A.; Garcia, G. J.; Gil, P.; Pomares, J.; Puente, S. T.; Torres, F., En Proceedings of the IFAC International Workshop on Intelligent Manufacturing Systems, Szczecin, Poland, Octubre 2008; pp. 189-194.

Este artículo describe un sistema inteligente de ensamblado automático de una estructura de aluminio. En este sistema destacan varias técnicas de control automático, como el método de seguimiento intemporal de trayectorias, que permite la interacción del robot con un operador humano. La tarea de inserción de los tubos requiere técnicas muy precisas de control visual-fuerza como las descritas en el Capítulo 6 de esta Tesis.

- **“A New Time-Independent Image Path Tracker to Guide Robots Using Visual Servoing”**, Garcia, G. J.; Pomares, J.; Torres, F., En Proceedings of the 12th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, Patras, Greece, September 2007; pp. 957-964.

El método de seguimiento intemporal de trayectorias en la imagen basado en control visual virtual se presenta en este artículo. Se compara con un método previo de seguimiento intemporal de trayectorias en la imagen (el control visual basado en flujo de movimiento), remarcando las mejoras del método propuesto.

- **“Robot Guidance by Estimating the Force-Image Interaction Matrix”**, Garcia, G. J.; Pomares, J.; Torres, F., En Proceedings of the 8th IFAC International Workshop on Intelligent Manufacturing Systems, Alicante, Spain, Mayo 2007; pp. 132-137.

Este artículo presenta un método de fusión de control visual-fuerza que utiliza la matriz de interacción fuerza-imagen para controlar a un robot en tareas donde haya interacción con el entorno. La matriz de interacción se estima a partir de un método basado en el algoritmo de Gauss-Newton.

- **“Visual - Force Control and Structured Light Fusion to Improve Recognition of Discontinuities in Surfaces”**, Pomares, J.; Gil, P.; Garcia, G. J.; Torres, F., En Proceedings of the IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, Praga, Czech Republic, Septiembre 2006; pp. 1044-1050.

Este artículo describe un método robusto de detección de cambios en las superficies a partir de la información obtenida del sensor de fuerza y de luz estructurada. Los fallos en la detección de estos cambios usando únicamente información de fuerza se consiguen reparar con la información obtenida a partir de la proyección sobre el objeto de haces de luz de un laser.

- **“Improving Tracking Trajectories with Motion Estimation”**, Pomares, J.; Garcia, G. J.; Torres, F., En Proceedings of the 3rd International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics, Setubal, Portugal, Agosto 2006; pp. 97-103.

El cálculo de la velocidad de la cámara durante una tarea de control visual permite mejorar el comportamiento de los algoritmos de control visual aplicados al seguimiento de objetos en movimiento. En este artículo se hace uso de la matriz de homografía 2D para calcular la velocidad de la cámara a partir de la imagen previa y la actual.

- **“Multi-Sensorial System for the Generation of Disassembly Trajectories”**, Pomares, J.; Puente, S. T.; Garcia, G. J.; Torres, F., En Proceedings of the World Automation Congress, Budapest, Hungary, Julio 2006; pp. 1-6.

En este artículo se presenta un método para generar trayectorias para el desensamblado automático de distintos tipos de artículos. El sistema utiliza información visual y de un sensor de fuerza para evitar los factores desconocidos en el plan de desensamblado y corregir las trayectorias generadas que se basan en el modelo del producto.

- **“Impedance Control for Fusing Multisensorial Systems in Robotic Manipulation Tasks”**, Pomares, J.; García, G. J.; Torres, F., En Proceedings of the WSEAS International Conference on Dynamical Systems and Control, Venice, Italy, Noviembre 2005; pp. 357-362.

En este artículo se presenta un control de impedancia para guiar un robot en entornos donde hay interacción. Este control de impedancia se realimenta



con información visual al reemplazar el controlador de posición por un control visual basado en flujo de movimiento. De esta forma se puede realizar el seguimiento de una trayectoria mientras se tiene en cuenta las fuerzas de interacción con el entorno.

### 8.2.4 Congresos Nacionales

- **“Seguimiento Intemporal de Trayectorias en la Imagen Basado en Control Visual Dinámico”**, Garcia, G. J.; Pomares, J.; Gil, P.; Torres, F., En Proceedings de las XXX Jornadas de Automática, Valladolid, Spain, Septiembre 2009.

Este artículo describe el método de umbral de error descrito en el Capítulo 5 de esta Tesis. Este esquema de control permite realizar seguimientos de trayectorias con comportamiento intemporal sobre un robot de dos grados de libertad utilizando control visual directo.

- **“Estudio de la Influencia del Muestreo en el Seguimiento Intemporal de Trayectorias Basado en Control Visual Virtual”**, Garcia, G. J.; Pomares, J.; Torres, F., En Proceedings de las XXIX Jornadas de Automática, Tarragona, Spain, Septiembre 2008; pp. 533-540.

El método de seguimiento intemporal de trayectorias basado en control visual virtual depende del número de muestras de la trayectoria deseada. En este artículo se realiza un estudio del comportamiento del sistema ante variaciones en el muestreo de la trayectoria.

- **“Control Visual para el Seguimiento Intemporal de Trayectorias Empleando el Espacio de Normas de la Matriz de Homografía 2D”**, Garcia, G. J.; Pomares, J.; Torres, F., En Proceedings de las XXVIII Jornadas de Automática, Huelva, Spain, Septiembre 2007; pp. 310-318.

Este artículo describe un método de seguimiento intemporal de trayectorias basado en la matriz de homografía 2-D. A partir de la homografía 2-D se pueden relacionar dos imágenes distintas de la trayectoria de una cámara. El tratamiento en conjunto de las características visuales mejora el comportamiento respecto a otros sistemas de seguimiento intemporal como el control visual basado en flujo de movimiento.

- **“Sistema de Simulación y Evaluación de Tareas de Control Visual Basado en Control Visual Virtual”**, Garcia, G. J.; Payá, L.; Pomares, J.; Torres, F., En Proceedings de las XXVII Jornadas de Automática, Almería, Spain, Septiembre 2006; pp. 524-530.

ViSeC es una herramienta presentada en un artículo previo. En este artículo se amplían las capacidades de esta herramienta aplicando control visual virtual para conseguir mover la cámara virtual del simulador de ViSeC y, de esta forma, realizar un control visual simulado. El control visual virtual permite obtener los parámetros extrínsecos de la cámara durante el control visual simulado.

- **“Control Visual Flexible Empleando Momentos Invariantes”**, Garcia, G. J.; Pomares, J.; Torres, F., En Proceedings de las XXVI Jornadas de Automática, Alicante, Spain, Septiembre 2005; pp. 587-592.

El artículo presenta la formulación necesaria para realizar el control visual con momentos invariantes. Los momentos invariantes permiten realizar el control visual con objetos en los que no es sencillo obtener puntos característicos.

- **“Control Visual de Robots Manipuladores. Una Herramienta para su Diseño y Aprendizaje”**, Garcia, G. J.; Pomares, J.; Torres, F., En Proceedings de las XXV Jornadas de Automática, Ciudad Real, Spain, Septiembre 2004; pp. 120-127. *Premio OMRON de Iniciación a la Investigación e Innovación en Automática.*

En este artículo se presentó ViSeC, una herramienta que permite realizar tareas de control visual. ViSeC permite obtener todo tipo de gráficas de la tarea de control realizada. El resultado es una herramienta flexible, fácil de manejar y perfecta para el diseño e implementación de nuevas estrategias de control visual.

### 8.3 Trabajos futuros

El diseño e implementación de distintos esquemas de control visual ha permitido detectar posibles líneas de investigación futuras. La gran mayoría de los sistemas de control visual propuestos en esta Tesis utilizan 4 puntos como características visuales. Si bien en la literatura pueden encontrarse un gran número de trabajos que proponen el uso de otras características visuales (como líneas, círculos, elipses, texturas o color), no ha sido objetivo de esta Tesis estudiar el comportamiento de los esquemas de control propuestos ante el uso de otras características. Por otro lado, la extensión del sistema de seguimiento propuesto en el Capítulo 3 con otro tipo de características resulta sencilla. Basta con modificar adecuadamente la matriz de interacción y almacenar en consecuencia la trayectoria deseada. Estas modificaciones se plantean como trabajo futuro. Un aspecto relacionado con el tipo de características visuales que resulta más interesante es conseguir el mejor conjunto de características a partir de una nube de puntos. En este caso se propone como trabajo futuro el diseño y elección de un índice de calidad sobre esa nube de puntos que permita continuar el seguimiento, a pesar de que las características inicialmente previstas sufran oclusiones o se salgan del plano imagen (debido por ejemplo a la realización de un zoom en la cámara durante el seguimiento).

Otra importante línea de investigación abierta se corresponde con las aportaciones presentadas en el Capítulo 5. Los distintos esquemas de seguimiento intemporal basado en control visual directo han sido comprobados en simulaciones bajo Matlab/Simulink. Estas simulaciones permiten validar las aproximaciones de control propuestas sobre un diseño inicial de un pequeño robot de dos grados de libertad que se está diseñando en el marco del proyecto MCYT “Manipulación inteligente mediante percepción háptica y control visual empleando una estructura articular ubicada en el robot manipulador (DPI2008-02647)”. Tras superar la fase de diseño, se obtendrá un primer prototipo sobre el que se podrán aplicar directamente los sistemas de control

presentados en el Capítulo 5. El conocimiento preciso de los parámetros dinámicos (al construir por completo el nuevo robot) es necesario para el correcto funcionamiento del controlador visual directo. El robot que se construirá para el proyecto MCYT irá situado en el extremo del robot manipulador Mitsubishi PA-10 (ver Fig. 5-3). El principal problema que se presenta en esta nueva línea de investigación es la elección del método que permita controlar, a partir de la información visual de la cámara situada en el mini-robot, al brazo robótico de Mitsubishi.

Otra línea de investigación que mejoraría los sistemas de control visual descritos en esta Tesis está relacionada con el ajuste adaptativo de la ganancia del sistema de control. Un ajuste automático de las ganancias de los sistemas de control mejorará el comportamiento de estos sistemas. Emplear una misma ganancia para todo tipo de tareas de control visual provocará comportamientos muy oscilantes en aquellos casos en los que esta ganancia sea muy alta para el tipo de características o la posición de las características actuales y su diferencia respecto a las deseadas. También puede provocar posicionamientos muy lentos que llevarían al sistema de seguimiento a saltarse muchas referencias para conseguir mantener la velocidad deseada.

El empleo de dos sensores de naturaleza distinta, como un sensor de fuerza y una cámara, ha permitido obtener un sistema multisensorial capaz de interactuar de una forma más completa con el entorno. También ha introducido mayor complejidad al sistema, al ser una fusión compleja de información, que requería mecanismos específicos que cohesionaran las dos informaciones para obtener una única acción de control válida. Sin embargo, en tareas muy precisas de manipulación inteligente se necesita controlar de manera local el contacto entre el manipulador y el objeto manipulado. Se plantea como trabajo futuro la fusión del esquema de control visual-fuerza propuesto con un sistema de control táctil que permita obtener un sistema más robusto y preciso para tareas de manipulación inteligente. Otra línea posible de investigación futura es el estudio, diseño e implementación de un control híbrido logrando una separación automática de las direcciones controladas por cada sistema, de forma que se pudieran fusionar la información visual, de fuerza y táctil actualizando en cada momento qué sistema debe controlar cada una de las direcciones disponibles.

Las cámaras de rango o cámaras 3-D permiten obtener la distancia entre cámara y objeto además de la imagen de éste. La ventaja inmediata de usar este tipo de cámaras para realizar control visual es el conocimiento directo de la profundidad de cada característica. Este valor es necesario para el cálculo preciso de la matriz de interacción, y su conocimiento permite obtener una evolución recta de las características en la imagen, con lo que se evita perder las características en la tarea de control visual. El principal problema que presenta este tipo de cámaras es la poca frecuencia de adquisición, que además depende del tiempo de integración. Este tiempo a su vez depende de la distancia entre la cámara y el objeto. Se abre en este sentido una posible línea de investigación que resuelva el problema del tiempo de muestreo y, sobre todo, que permita elegir otro tipo de características visuales con la información que proporcionan este tipo de cámaras 3-D.

# Cuaternios

## A1 Cuaternios

El presente Anexo introduce el concepto de cuaternio. Los cuaternios unitarios proporcionan una notación matemática para representar las orientaciones y las rotaciones de objetos en tres dimensiones. Presentan ventajas muy importantes respecto a otros sistemas de representación de la rotación clásicos. Es más eficiente que las matrices de rotación, al tiempo que no presentan resultados inconsistentes debido a singularidades. La interpolación con ángulos de Euler no ofrece trayectorias de la orientación

A1.1 <b>Definición</b> .....	235
A1.2 <b>Transformaciones básicas</b> .....	235
A1.3 <b>Interpolación de la orientación</b> .....	236

naturales, presentando extrañas evoluciones de la orientación.

El objetivo de este Anexo es presentar la formulación necesaria para la interpolación de la orientación mediante Cuaternios. Esta interpolación se emplea en los métodos de seguimiento de trayectorias en la imagen descritos en la presente Tesis.

### A1.1 Definición

Los cuaternios son una forma de representar giros y orientaciones entre dos sistemas de referencia. Un cuaternio  $Q$  está constituido por cuatro componentes ( $q_0, q_1, q_2, q_3$ ) que representan las coordenadas del cuaternio en una base  $\{\mathbf{w}, \mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}\}$ . Normalmente, se denomina parte escalar a la componente en  $\mathbf{w}$ , y parte vectorial al resto. Así, un cuaternio se puede representar como:

$$Q = q_0 \mathbf{w} + q_1 \mathbf{i} + q_2 \mathbf{j} + q_3 \mathbf{k} = [\mathbf{c}, \mathbf{b}], \quad (\text{A1.1})$$

donde  $\mathbf{c}$  representa la parte escalar y  $\mathbf{b}$  representa la parte vectorial.

Para entender qué es un cuaternio se asocia el giro de un ángulo  $\theta$  sobre el vector  $\mathbf{h}$  al cuaternio definido por:

$$Q = \text{Rot}(\mathbf{h}, \theta) = \left( \cos \frac{\theta}{2}, \mathbf{h} \sin \frac{\theta}{2} \right). \quad (\text{A1.2})$$

### A1.2 Transformaciones básicas

Tal como se define en [Beggs-1983] la matriz de rotación de una matriz homogénea se puede obtener a partir de un cuaternio de la siguiente manera:

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} 2q_0^2 + 2q_1^2 - 1 & 2q_1q_2 - 2q_3q_0 & 2q_1q_3 + 2q_2q_0 \\ 2q_1q_2 + 2q_3q_0 & 2q_0^2 + 2q_2^2 - 1 & 2q_2q_3 - 2q_1q_0 \\ 2q_1q_3 - 2q_2q_0 & 2q_2q_3 + 2q_1q_0 & 2q_0^2 + 2q_3^2 - 1 \end{pmatrix}. \quad (\text{A1.3})$$

La matriz de rotación  $\mathbf{R}$  queda definida mediante sus elementos de la siguiente manera:

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} n_x & o_x & a_x \\ n_y & o_y & a_y \\ n_z & o_z & a_z \end{pmatrix}. \quad (\text{A1.4})$$

A partir de esta matriz de rotación, para calcular el cuaternio asociado se utiliza la relación indicada en [Barrientos-2007]:

$$\begin{aligned} q_0 &= \frac{1}{2} \sqrt{(n_x + o_y + a_z + 1)}, \\ q_1 &= \frac{1}{2} \sqrt{(n_x - o_y - a_z + 1)}, \\ q_2 &= \frac{1}{2} \sqrt{(-n_x + o_y - a_z + 1)}, \\ q_3 &= \frac{1}{2} \sqrt{(-n_x - o_y + a_z + 1)}. \end{aligned} \quad (\text{A1.5})$$

### A1.3 Interpolación de la orientación

Como es conocido, la especificación de la posición por parte del usuario se realiza habitualmente, y salvo escasas excepciones, en coordenadas cartesianas. Sin embargo, la especificación de la orientación puede realizarse mediante diferentes herramientas, como: matrices de rotación, ángulos de Euler, par de rotación o cuaternios.

Para la posición, la interpolación lineal es la evolución lineal, a velocidad constante, de cada coordenada cartesiana desde su valor inicial hasta el final, resultando un movimiento sencillo, fácilmente interpretable por el usuario y de calidad.

Sin embargo, para el caso de la orientación, esta evolución lineal desde el valor inicial hasta el final puede ser planteado en términos de matrices de rotación, ángulos de Euler, par de rotación o cuaternios, resultando en cada caso trayectorias diferentes.

La utilización de las matrices de rotación lleva a resultados inconsistentes. Como es sabido, las matrices de rotación deben ser necesariamente matrices ortonormales. La interpolación lineal entre una matriz de rotación inicial y otra final lleva a matrices intermedias no ortonormales y, por lo tanto, que no corresponden a matrices de rotación.

La utilización de ángulos de Euler, en cualquiera de sus formas, además de ser la representación más compacta no presenta este inconveniente. Así, para pasar de una orientación inicial  $(\alpha_i, \beta_i, \gamma_i)$  a una final  $(\alpha_f, \beta_f, \gamma_f)$  se podrían utilizar las funciones lineales:

$$\begin{aligned}\alpha(t) &= (\alpha_f - \alpha_i) \frac{t - t_i}{t_f - t_i} + \alpha_i, \\ \beta(t) &= (\beta_f - \beta_i) \frac{t - t_i}{t_f - t_i} + \beta_i, \\ \gamma(t) &= (\gamma_f - \gamma_i) \frac{t - t_i}{t_f - t_i} + \gamma_i,\end{aligned}\tag{A1.6}$$

donde  $t_i$  y  $t_f$  son los instantes de tiempo en los que se pretende estar en la orientación inicial y final respectivamente. El inconveniente de esta trayectoria es que desde el punto de vista del usuario es una trayectoria no intuitiva, con extrañas evoluciones de la orientación.

La evolución más natural desde una orientación inicial hasta otra final, sería aquella que hace girar de manera progresiva al efector final (u objeto manipulado por el robot) desde su orientación inicial hasta la final en torno a un eje de giro fijo. Por este motivo, la utilización del par de rotación, o su equivalente, los cuaternios, es la manera más adecuada para generar la trayectoria cartesiana de orientación. La Fig. A1-1 muestra la esfera del espacio de cuaternios, indicando un esquema de la interpolación entre dos cuaternios:  $Q_a$  a  $Q_b$ .

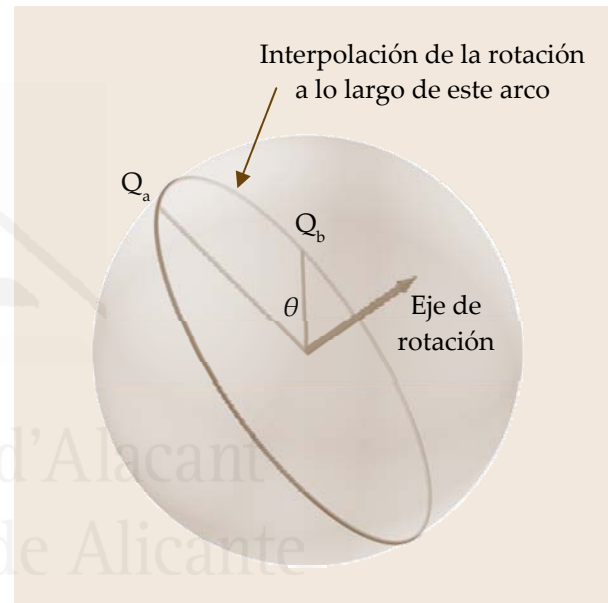


Fig. A1-1 Interpolación de cuaternios

Si  $Q$  es el cuaternio que rota desde  $Q_a$  a  $Q_b$ , entonces:

$$Q_b = Q_a \cdot Q.\tag{A1.7}$$

Multiplicando ambos lados por el conjugado de  $Q_a$  permite obtener:

$$Q = \text{conj}(Q_a) \cdot Q_b.\tag{A1.8}$$

La parte real de la multiplicación es:

$$\begin{aligned}\text{real}\left(\left(Q_a \cdot w + iQ_a \cdot x + jQ_a \cdot y + kQ_a \cdot z\right) \cdot \left(Q_b \cdot w + iQ_b \cdot x + jQ_b \cdot y + kQ_b \cdot z\right)\right) = \\ = Q_a \cdot w \cdot Q_b \cdot w - Q_a \cdot x \cdot Q_b \cdot x - Q_a \cdot y \cdot Q_b \cdot y - Q_a \cdot z \cdot Q_b \cdot z.\end{aligned}\tag{A1.9}$$

Entonces, usando el conjugado de  $Q_a$  proporciona:

$$\begin{aligned}\text{real}\left(\left(Q_a \cdot w - iQ_a \cdot x - jQ_a \cdot y - kQ_a \cdot z\right) \cdot \left(Q_b \cdot w + iQ_b \cdot x + jQ_b \cdot y + kQ_b \cdot z\right)\right) = \\ = Q_a \cdot w \cdot Q_b \cdot w + Q_a \cdot x \cdot Q_b \cdot x + Q_a \cdot y \cdot Q_b \cdot y + Q_a \cdot z \cdot Q_b \cdot z.\end{aligned}\tag{A1.10}$$

Como:

$$\text{real}(Q) = \cos\left(\frac{t}{2}\right).\tag{A1.11}$$



Por lo tanto:

$$\cos\left(\frac{\theta}{2}\right) = Q_a.w \cdot Q_b.w + Q_a.x \cdot Q_b.x + Q_a.y \cdot Q_b.y + Q_a.z \cdot Q_b.z. \quad (A1.12)$$

Como puede apreciarse, tiene el aspecto de un producto escalar de vectores. Para obtener la ecuación que permite calcular el cuaternio interpolado se usa la siguiente ecuación:

$$Q_m = \frac{Q_a \cdot \sin((1-t)\theta) + Q_b \cdot \sin(t\theta)}{\sin\theta}. \quad (A1.13)$$

donde:

- $Q_m$  es el cuaternio interpolado.
- $Q_a$  es el primer cuaternio en la trayectoria de interpolación.
- $Q_b$  es el último cuaternio en la trayectoria de interpolación.
- $t$  es un escalar entre 0.0 (en  $Q_a$ ) y 1.0 (en  $Q_b$ ).
- $\theta$  es la mitad del ángulo entre  $Q_a$  y  $Q_b$ .

Para convertir de  $\cos(\theta)$  a  $\sin(\theta)$  la mejor opción es usar:

$$\sin(\theta) = \sin(\arccos(\cos(\theta))). \quad (A1.14)$$

O también:

$$\sin(\theta) = \sqrt{1 - \cos^2(\theta)}. \quad (A1.15)$$

# Método de optimización de Levenberg-Marquardt

En matemáticas e informática, el algoritmo de Levenberg-Marquardt proporciona una solución numérica para el problema de minimizar una función, generalmente no lineal, sobre un espacio de parámetros de la función.

El método de Levenberg-Marquardt ha tenido una enorme trascendencia práctica en problemas de ajuste de parámetros y es el algoritmo de referencia para optimizar la calibración de cámaras.

El algoritmo de Levenberg-Marquardt interpola entre el método de Gauss-Newton y el de descenso por gradiente.

A2.1 **Introducción**.....239

A2.2 **El algoritmo de Levenberg-Marquardt**.....239

Es más robusto que el método de Gauss-Newton, lo que significa que en muchos casos se encuentra una solución, incluso si se inicia muy lejos del mínimo final.

Este método de optimización se emplea para obtener la velocidad deseada dentro del método de seguimiento intemporal basado en control visual virtual descrito en el Capítulo 3 de esta Tesis.

## A2.1 Introducción

El algoritmo de Levenberg-Marquardt es una técnica iterativa que obtiene el mínimo de una función que se expresa como la suma de los cuadrados de funciones reales no lineales [Levenberg -1944, Marquardt-1963]. Se ha convertido en una técnica estándar para resolver problemas de mínimos cuadrados no lineales, ampliamente adoptados en un amplio espectro de disciplinas. El algoritmo de Levenberg-Marquardt puede entenderse como una interpolación entre el descenso por gradiente y el método de Gauss-Newton. Cuando la solución actual está muy alejada de la correcta, el algoritmo se comporta como un método de descenso por gradiente: lento, pero garantizando la convergencia. Cuando la solución actual se acerca a la correcta, se convierte en un método de Gauss-Newton. A continuación se presenta una breve descripción del algoritmo de Levenberg-Marquardt.

## A2.2 El algoritmo de Levenberg-Marquardt

Considérese  $f$  una relación funcional que relaciona un vector de parámetros  $\mathbf{p} \in \mathfrak{R}^m$  con un vector de medida estimado  $\hat{\mathbf{x}} = f(\mathbf{p})$ ,  $\mathbf{x} \in \mathfrak{R}^n$ . Inicialmente se dispone de una estimación inicial del parámetro  $\mathbf{p}_0$  y un vector de medida  $\mathbf{x}$  y se desea encontrar el vector que mejor satisface la relación funcional  $f$ , es decir minimizar la distancia al cuadrado  $\boldsymbol{\varepsilon}^T \boldsymbol{\varepsilon}$  con  $\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}$ . La base del algoritmo de Levenberg-Marquardt es una

aproximación lineal a  $f$  en la vecindad de  $\mathbf{p}$ . Para una pequeña variación de  $\mathbf{p}$ ,  $\|\delta_p\|$ , la expansión de la serie de Taylor lleva a la aproximación:

$$f(\mathbf{p} + \delta_p) \approx f(\mathbf{p}) + \mathbf{J}\delta_p. \quad (\text{A2.1})$$

donde  $\mathbf{J}$  es la matriz Jacobiana  $\frac{\partial f(\mathbf{p})}{\partial \mathbf{p}}$ . Como todos los métodos de optimización no lineal, el algoritmo de Levenberg-Marquardt es iterativo: iniciado en el punto inicial  $\mathbf{p}_0$ , el método produce una serie de vectores  $\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \dots$ , que convergen hacia un minimizador local  $\mathbf{p}^+$  para  $f$ . Así, en cada paso, se requiere encontrar el  $\delta_p$  que minimiza la cantidad  $\|x - f(\mathbf{p} + \delta_p)\| \approx \|x - f(\mathbf{p}) - \mathbf{J}\delta_p\| = \|\varepsilon - \mathbf{J}\delta_p\|$ . El  $\delta_p$  buscado es por tanto la solución al problema de mínimos cuadrados lineal. Se logra el mínimo cuando  $\mathbf{J}\delta_p - \varepsilon$  es ortogonal a las columnas de  $\mathbf{J}$ . Esto lleva a  $\mathbf{J}^T(\mathbf{J}\delta_p - \varepsilon) = 0$ , lo que permite obtener  $\delta_p$  como la solución de las llamadas ecuaciones normales:

$$\mathbf{J}^T \mathbf{J} \delta_p = \mathbf{J}^T \varepsilon. \quad (\text{A2.2})$$

La matriz  $\mathbf{J}^T \mathbf{J}$  en el lado izquierdo de la Ecuación (A2.2) es la Hessiana aproximada, es decir, una estimación de la matriz de las derivadas de segundo orden. El método de Levenberg-Marquardt realmente soluciona una ligera variación de la Ecuación (A2.2), conocida como las ecuaciones normales aumentadas:

$$\mathbf{N} \delta_p = \mathbf{J}^T \varepsilon. \quad (\text{A2.3})$$

donde los elementos no diagonales de la matriz  $\mathbf{N}$  son idénticos a los elementos correspondientes de  $\mathbf{J}^T \mathbf{J}$  y los elementos diagonales se obtienen con  $N_{ii} = \mu + [\mathbf{J}^T \mathbf{J}]_{ii}$  para valores de  $\mu > 0$ . La estrategia de modificar los elementos diagonales de  $\mathbf{J}^T \mathbf{J}$  se llama "damping" y al término  $\mu$  se le llama "término de damping". Si el vector actualizado  $\mathbf{p} + \delta_p$  con  $\delta_p$  calculado a partir de la Ecuación (A2.3) conduce a una reducción del error  $\varepsilon$ , la actualización se acepta y el proceso se repite con un término de damping menor. En caso contrario, se incrementa el término de damping, se resuelven las ecuaciones normales aumentadas de nuevo y el proceso itera hasta que se encuentre un valor de  $\delta_p$  que disminuya el error. El proceso de resolver repetidamente la Ecuación (A2.3) para distintos valores del término de damping hasta que se encuentra una actualización aceptable del vector de parámetro se corresponde con una iteración del algoritmo de Levenberg-Marquardt. En el algoritmo de Levenberg-Marquardt, el término de damping se ajusta en cada iteración para asegurar una reducción en el error  $\varepsilon$ . Si el damping se establece como un valor muy alto, la matriz  $\mathbf{N}$  de la Ecuación (A2.3) es prácticamente diagonal y el paso de actualización del algoritmo de Levenberg-Marquardt es muy cercano a la dirección del descenso por gradiente. Además, el valor de  $\delta_p$  se reduce en este caso. El damping también maneja situaciones donde el Jacobiano tiene rango deficiente y  $\mathbf{J}^T \mathbf{J}$  es por lo tanto singular. En este caso, el algoritmo de Levenberg-Marquardt puede buscar efectivamente en una región del espacio de parámetros en el que el modelo es altamente no lineal. El algoritmo de Levenberg-Marquardt es adapta-

tivo porque controla su propio damping: sube el damping si un paso falla en la reducción de  $\varepsilon$ ; en caso contrario reduce el damping. De esta forma el algoritmo es capaz de alternar entre una aproximación de descenso lento cuando se encuentra lejos del mínimo, y una rápida convergencia cuando se encuentra en un entorno cercano del mínimo. El algoritmo de Levenberg-Marquardt termina cuando al menos se cumple una de las siguientes condiciones:

- El valor del gradiente de  $\varepsilon^T \varepsilon$ , es decir,  $\mathbf{J}^T \varepsilon$  en el lado derecho de la Ecuación (A2.2), se sitúa por debajo de un umbral  $\varepsilon_1$ .
- El cambio relativo en el valor de  $\delta_p$  disminuye por debajo de un umbral  $\varepsilon_2$ .
- El error  $\varepsilon^T \varepsilon$  disminuye por debajo de un umbral  $\varepsilon_3$ .
- Se completa un número máximo de iteraciones  $k_{\max}$ .

Si está disponible una matriz de covarianza  $\Sigma_x$  para el vector de medida, se puede incorporar en el algoritmo de Levenberg-Marquardt minimizando la norma al cuadrado  $\varepsilon^T \Sigma_x^{-1} \varepsilon$  en lugar de la Euclídea  $\varepsilon^T \varepsilon$ . Por consiguiente, el mínimo se encuentra resolviendo un problema de mínimos cuadrados ponderados definido por las ecuaciones normales ponderadas:

$$\mathbf{J}^T \Sigma_x^{-1} \mathbf{J} \delta_p = \mathbf{J}^T \Sigma_x^{-1} \varepsilon. \quad (\text{A2.4})$$

El resto del algoritmo permanece sin cambios.



Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante

# Referencias

- [Abderrahim-2005]** Abderrahim, M.; Diaz, J. C.; Rossi, C.; Salichs, M. A., "Experimental Simulation of Satellite Relative Navigation Using Computer Vision", En Proceedings of the 2nd International Conference on Recent Advances in Space Technologies, Istanbul, Turkey, Junio 2005; pp. 379-384.
- [Abolmaesumi-2002]** Abolmaesumi, P.; Salcudean, S. E.; Wen-Hong, Z.; Sirouspour, M. R.; DiMaio, S. P., "Image-Guided Control of a Robot for Medical Ultrasound". Robotics and Automation, IEEE Transactions on, 18(1) pp. 11-23, 2002.
- [Agarwal-2006]** Agarwal, A.; Triggs, B., "Recovering 3d Human Pose from Monocular Images". Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, 28(1) pp. 58, 2006.
- [Allen-1991]** Allen, P. K.; Yoshimi, B.; Timcenko, A., "Real-Time Visual Servoing", En Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Sacramento, CA, USA, Abril 1991; pp. 851-856.
- [Amat-2004]** Amat, J.; Frigola, M.; Casals, A., "Human Robot Interaction from Visual Perception", En Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Sendai, Japan, Septiembre 2004; pp. 1997-2002.
- [Angel-2004]** Angel, L.; Saltaren, R.; Sebastian, J. M.; Hansson, A.; Aracil, R., "Robotenis: Parallel Robot with Visual Control", En Proceedings of the 10th International Symposium on Robotics and Applications held at the 6th Biannual World Automation Congress, Seville, Spain, Junio 2004; pp. 405-412.
- [Angel-2005]** Angel, L.; Sebastian, J. M.; Saltaren, R.; Aracil, R.; Sanpedro, J., "Robotenis: Optimal Design of a Parallel Robot with High Performance", En Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Edmonton, Canada, Agosto 2005; pp. 2134-2139.
- [Angel-2008]** Angel, L.; Traslosheros, A.; Sebastian, J. M.; Pari, L.; Carelli, R.; Roberti, F., "Vision-Based Control of the Robotenis System". En Recent Progress in Robotics: Viable Robotic Service to Human, S. Lee, I. H. Suh and M. S. Kim, Eds.; Springer-Verlag: Berlin, 2008; Vol. 370, pp. 229-240.
- [Azinheira-2008]** Azinheira, J. R.; Rives, P., "Image-Based Visual Servoing for Vanishing Features and Ground Lines Tracking: Application to a Uav Automatic Landing". International Journal of Optomechatronics, 2(3) pp. 275-295, 2008.
- [Bachiller-2003]** Bachiller, M.; Cerrada, J. A.; Cerrada, C., "A Modular Scheme for Controller Design and Performance Evaluation in 3d Visual Servoing". Journal of Intelligent & Robotic Systems, 36(3) pp. 235-264, Marzo 2003.



- [Baeten-2002a] Baeten, J.; Bruyninckx, H.; De Schutter, J., "Shared Control in Hybrid Vision/Force Robotic Servoing Using the Task Frame", En Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems Lausanne, Switzerland, Septiembre 2002; pp. 2128-2133.
- [Baeten-2002b] Baeten, J.; De Schutter, J., "Hybrid Vision/Force Control at Corners in Planar Robotic-Contour Following". *Mechatronics*, IEEE/ASME Transactions on, 7(2) pp. 143-151, 2002.
- [Baeten-2003] Baeten, J.; Bruyninckx, H.; De Schutter, J., "Integrated Vision/Force Robotic Servoing in the Task Frame Formalism". *The International Journal of Robotics Research*, 22(10-11) pp. 941-954, 2003.
- [Baeten-2008] Baeten, J.; Donné, K.; Boedrij, S.; Beckers, W.; Claesen, E., "Autonomous Fruit Picking Machine: A Robotic Apple Harvester". En *Field and Service Robotics*, C. Laugier and R. Siegwart, Eds.; Springer-Verlag: Berlin, 2008; pp. 531-539.
- [Barrientos-2007] Barrientos, A.; Peñín, L. F.; Balaguer, C.; Aracil, R., "Fundamentos De Robótica, 2ª Ed.". McGraw-hill: 2007; pp. 512.
- [Becerra-2008] Becerra, H. M.; Sagues, C., "A Sliding Mode Control Law for Epipolar Visual Servoing of Differential-Drive Robots", En Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Nice, FRANCE, Septiembre 2008; pp. 3058-3063.
- [Beggs-1983] Beggs, J. S., "Kinematics". Springer Verlag: Berlin, 1983; pp. 223.
- [Behringer-1995] Behringer, R., "Detection of Discontinuities of Road Curvature Change by G<sub>l</sub>r", En Proceedings of the Intelligent Vehicles '95 Symposium, Detroit, MI, USA, Septiembre 1995; pp. 78-83.
- [Benhimane-2007] Benhimane, S.; Malis, E., "Homography-Based 2d Visual Tracking and Servoing". *International Journal of Robotics Research*, 26(7) pp. 661-676, 2007.
- [Bishop-1999] Bishop, B. E.; Spong, M. W., "Adaptive Calibration and Control of 2d Monocular Visual Servo Systems". *Control Engineering Practice*, 7(3) pp. 423-430, 1999.
- [Blanc-2005] Blanc, G.; Mezouar, Y.; Martinet, P., "Indoor Navigation of a Wheeled Mobile Robot Along Visual Routes", En Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Barcelona, Spain, Abril 2005; pp. 3354-3359.
- [Bonin-Font-2008] Bonin-Font, F.; Ortiz, A.; Oliver, G., "Visual Navigation for Mobile Robots: A Survey". *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 53(3) pp. 263-296, 2008.
- [Borangiu-2003] Borangiu, T.; Ionescu, F.; Manu, M., "Visual Servoing in Robot Motion Control". *Int Inst Informatics & Systemics*: Orlando, 2003; pp. 369-373.
- [Bourquardez-2007] Bourquardez, O.; Chaumette, F., "Visual Servoing of an Airplane for Alignment with Respect to a Runway", En Proceedings of the IEEE

- International Conference on Robotics and Automation, Rome, Italy, Abril 2007; pp. 1330-1335.
- [Bruyninckx-1996]** Bruyninckx, H.; De Schutter, J., "Specification of Force-Controlled Actions in The "Task Frame Formalism"-a Synthesis". Robotics and Automation, IEEE Transactions on, 12(4) pp. 581-589, 1996.
- [Campoy-2008]** Campoy, P.; Correa, J. F.; Mondragon, I.; Martinez, C.; Olivares, M.; Mejias, L.; Artieda, J., "Computer Vision Onboard Uavs for Civilian Tasks", En Proceedings of the International Symposium on Unmanned Aerial Vehicles, Orlando, FL, USA, Junio 2008; pp. 105-135.
- [Carelli-1994]** Carelli, R.; Nasisi, O.; Kuchen, B., "Adaptive Robot Control with Visual Feedback", En Proceedings of the American Control Conference, Baltimore, MD, USA, Junio 1994; pp. 1757-1760.
- [Carelli-2004]** Carelli, R.; Oliva, E.; Soria, C.; Nasisi, O., "Combined Force and Visual Control of an Industrial Robot". Robotica, 22(2) pp. 163-171, 2004.
- [Cervera-1996]** Cervera, E.; Del Pobil, A. P.; Marta, E.; Serna, M. A., "Perception-Based Learning for Motion in Contact in Task Planning". Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications, 17(3) pp. 283-308, 1996.
- [Cervera-1999a]** Cervera, E.; Martinet, P., "Visual Servoing with Indirect Image Control and a Predictable Camera Trajectory", En Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Kyongju, Korea, Octubre 1999a; pp. 381-386.
- [Cervera-1999b]** Cervera, E.; Martinet, P., "Combining Pixel and Depth Information in Image-Based Visual Servoing", En Proceedings of the IEEE International Conference on Advanced Robotics, Tokyo, Japan, Octubre 1999b; pp. 445-450.
- [Cervera-2001a]** Cervera, E.; Berry, F.; Martinet, P., "Stereo Visual Servoing with a Single Point: A Comparative Study", En Proceedings of the IEEE International Conference on Advanced Robotics, Budapest, Hungary, Agosto 2001a; pp. 213-218.
- [Cervera-2001b]** Cervera, E.; Martinet, P., "Stacking Jacobians Properly in Stereo Visual Servoing", En Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Seoul, Korea, Mayo 2001b; pp. 717-722.
- [Cervera-2002a]** Cervera, E., "Visual Servoing Toolbox for Matlab/Simulink", <http://vstoolbox.sourceforge.net>, 2002a.
- [Cervera-2002b]** Cervera, E.; Berry, F.; Martinet, P., "Is 3d Useful in Stereo Visual Control?", En Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Washington, DC, USA, Mayo 2002b; pp. 1630-1635.
- [Cervera-2002c]** Cervera, E.; Del Pobil, A. P., "Sensor-Based Learning for Practical Planning of Fine Motions in Robotics". Information Sciences, 145(1-2) pp. 147-168, 2002c.

- [Cervera-2003a] Cervera, E.; Berry, F.; Martinet, P., "Stereo Visual Servoing with Oriented Blobs", En Proceedings of the 11th International Conference on Advanced Robotics, Coimbra, Portugal, Junio 2003a; pp. 977-982.
- [Cervera-2003b] Cervera, E.; del Pobil, A. P.; Berry, F.; Martinet, P., "Improving Image-Based Visual Servoing with Three-Dimensional Features". International Journal of Robotics Research, 22(10-11) pp. 821-839, 2003b.
- [Cervera-2005] Cervera, E., "Distributed Visual Servoing: A Cross-Platform Agent-Based Implementation", En Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Edmonton, Canada, Agosto 2005; pp. 3676-3681.
- [Cervera-2006] Cervera, E., "A Cross-Platform Network-Ready Visual Servo Simulator", En Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Beijing, Peoples R. China, Octubre 2006; pp. 2314-2319.
- [Cervera-2008] Cervera, E.; Garcia-Aracil, N.; Martinez, E.; Nomdedeu, L.; del Pobil, A. P., "Safety for a Robot Arm Moving Amidst Humans by Using Panoramic Vision", En Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Pasadena, CA, USA, Mayo 2008; pp. 2183-2188.
- [Colombo-1999] Colombo, C.; Allotta, B., "Image-Based Robot Task Planning and Control Using a Compact Visual Representation". Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, IEEE Transactions on, 29(1) pp. 92-100, 1999.
- [Collewet-2000] Collewet, C.; Chaumette, F., "A Contour Approach for Image-Based Control on Objects with Complex Shape", En Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Takamatsu, Japan, Octubre 2000; pp. 751-756.
- [Collewet-2004] Collewet, C.; Alhaj, A.; Chaumette, F., "Model-Free Visual Servoing on Complex Images Based on 3d Reconstruction", En Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, New Orleans, LA, USA, Abril 2004; pp. 751-756.
- [Corke-1993] Corke, P. I., "Visual Control of Robot Manipulators - a Review". En Visual Servoing: Real-Time Control of Robot Manipulators Based on Visual Sensory Feedback, K. Hashimoto, Ed. World Scientific Pub Co Inc: 1993; pp. 300.
- [Corke-1996] Corke, P. I., "Visual Control of Robots : High-Performance Visual Servoing". Research Studies Press: Taunton, England, 1996.
- [Corke-2001] Corke, P. I.; Hutchinson, S. A., "A New Partitioned Approach to Image-Based Visual Servo Control". Robotics and Automation, IEEE Transactions on, 17(4) pp. 507-515, 2001.
- [Corrales-2008a] Corrales, J. A.; Candelas, F. A.; Torres, F., "Hybrid Tracking of Human Operators Using Imu/Uwb Data Fusion by a Kalman Filter", En Proceedings of

the 3rd ACM/IEEE International Conference on Human Robot Interaction, Amsterdam, The Netherlands, Marzo 2008; pp. 193-200.

- [Corrales-2008b]** Corrales, J. A.; Garcia, G. J.; Gil, P.; Pomares, J.; Puente, S. T.; Torres, F., "Intelligent Robotic Multisensorial System to Build Metallic Structures", En Proceedings of the IFAC International Workshop on Intelligent Manufacturing Systems, Szczecin, Poland, Octubre 2008; pp. 189-194.
- [Corrales-2010]** Corrales, J. A.; Garcia, G. J.; Candelas, F.; Pomares, J.; Torres, F., "Safe Cooperation between Human Operators and Visually Controlled Industrial Manipulators". En Advances in Human-Robot Interaction, A. Lazinica, Ed. In-Tech Press: Vukovar, Croatia, 2010.
- [Coulaud-2006]** Coulaud, J. B.; Campion, G.; Bastin, G.; De Wan, M., "Stability Analysis of a Vision-Based Control Design for an Autonomous Mobile Robot". Robotics, IEEE Transactions on, 22(5) pp. 1062-1069, 2006.
- [Cowan-1999]** Cowan, N. J.; Koditschek, D. E., "Planar Image Based Visual Servoing as a Navigation Problem", En Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Detroit, MI, USA, Mayo 1999; pp. 611-617.
- [Cowan-2002]** Cowan, N. J.; Weingarten, J. D.; Koditschek, D. E., "Visual Servoing Via Navigation Functions". Robotics and Automation, IEEE Transactions on, 18(4) pp. 521-533, 2002.
- [Cretual-1998]** Cretual, A.; Chaumette, F.; Bouthemy, P., "Complex Object Tracking by Visual Servoing Based on 2d Image Motion", En Proceedings of the International Conference on Pattern Recognition, Brisbane, Australia, Agosto 1998; pp. 1251-1254.
- [Chang-2004]** Chang, W.-C., "Cartesian-Based Planar Contour Following with Automatic Hybrid Force and Visual Feedback", En Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Sendai, Japan, Septiembre 2004; pp. 3062-3067.
- [Chaumette-1990]** Chaumette, F. "La Relation Vision-Commande: Théorie Et Application À Des Tâches Robotiques". Tesis, University of Rennes, Rennes, 1990.
- [Chaumette-1997]** Chaumette, F.; Malis, E.; Boudet, S., "2d 1/2 Visual Servoing with Respect to a Planar Object", En Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems - Workshop on New Trends in Image-based Robot Servoing, Grenoble, France, Septiembre 1997; pp. 45-52.
- [Chaumette-1998a]** Chaumette, F., "Potential Problems of Stability and Convergence in Image-Based and Position-Based Visual Servoing". En The Confluence of Vision and Control, D. J. Kriegman, Ed. Springer-Verlag: New York, 1998a; pp. 66-78.
- [Chaumette-1998b]** Chaumette, F., "Potential Problems of Convergence in Visual Servoing", En Proceedings of the International Symposium on Mathematical Theory of Networks and Systems, Padova, Italy, Julio 1998b.

- [Chaumette-2002]** Chaumette, F., "A First Step toward Visual Servoing Using Image Moments", En Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Lausanne, Switzerland, Septiembre 2002; pp. 378-383 vol.371.
- [Chaumette-2004]** Chaumette, F., "Image Moments: A General and Useful Set of Features for Visual Servoing". Robotics, IEEE Transactions on, 20(4) pp. 713-723, 2004.
- [Chaumette-2006]** Chaumette, F.; Hutchinson, S. A., "Visual Servo Control. I. Basic Approaches". Robotics & Automation Magazine, IEEE, 13(4) pp. 82-90, 2006.
- [Chen-2005]** Chen, J.; Dawson, D. M.; Dixon, W. E.; Behal, A., "Adaptive Homography-Based Visual Servo Tracking for a Fixed Camera Configuration with a Camera-in-Hand Extension". Control Systems Technology, IEEE Transactions on, 13(5) pp. 814-825, 2005.
- [Chen-2009]** Chen, Q.; Zheng, E.; Liu, Y., "Pose Estimation Based on Human Detection and Segmentation". Science in China Series F: Information Sciences, 52(2) pp. 244-251, 2009.
- [Cherubini-2008]** Cherubini, A.; Chaumette, F.; Oriolo, G., "An Image-Based Visual Servoing Scheme for Following Paths with Nonholonomic Mobile Robots", En Proceedings of the 10th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, Hanoi, Vietnam, Diciembre 2008; pp. 108-113.
- [Cherubini-2009]** Cherubini, A.; Chaumette, F., "Visual Navigation with a Time-Independent Varying Reference", En Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, St. Louis, MO, USA, Octubre 2009; pp. 5968-5973.
- [Chesi-2005]** Chesi, G.; Prattichizzo, D.; Vicino, A., "Visual Servoing: Reaching the Desired Location Following a Straight Line Via Polynomial Parameterizations", En Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Barcelona, Spain, Abril 2005; pp. 2559-2564.
- [Chesi-2007a]** Chesi, G.; Hung, Y. S., "Global Path-Planning for Constrained and Optimal Visual Servoing". Transactions on Robotics, IEEE 23(5) pp. 1050-1060, Octubre 2007a.
- [Chesi-2007b]** Chesi, G.; Prattichizzo, D.; Vicino, A., "Straight Line Path-Planning in Visual Servoing". Journal of Dynamic Systems Measurement and Control-Transactions of the Asme, 129(4) pp. 541-543, 2007b.
- [Chesi-2009]** Chesi, G., "Visual Servoing Path Planning Via Homogeneous Forms and Lmi Optimizations". Robotics, IEEE Transactions on, 25(2) pp. 281-291, Apr 2009.
- [Chriette-2001]** Chriette, A.; Hamel, T.; Mahony, R., "Visual Servoing for a Scale Model Autonomous Helicopter", En Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Seoul, Korea, Mayo 2001; pp. 1701-1706.



- [David-2004] David, P.; DeMenthon, D.; Duraiswami, R.; Samet, H., "Softposit: Simultaneous Pose and Correspondence Determination". *International Journal of Computer Vision*, 59 pp. 259-284, 2004.
- [De Fazio-1984] De Fazio, T. L.; Seltzer, D. S.; Whitney, D. E., "The Instrumented Remote Center of Compliance". *Industrial Robot*, 11(4) pp. 238-242, 1984.
- [De Luca-2008] De Luca, A.; Oriolo, G.; Giordano, P. R., "Feature Depth Observation for Image-Based Visual Servoing: Theory and Experiments". *International Journal of Robotics Research*, 27(10) pp. 1093-1116, Octubre 2008.
- [De Schutter-1998] De Schutter, J.; Bruyninckx, H.; Zhu, W.-H.; Spong, M., "Force Control: A Bird's Eye View". En *Control Problems in Robotics and Automation*, B. Siciliano and K. P. Valavani, Eds.; Springer-Verlag: Berlin, 1998; pp. 1-17.
- [Dean-Leon-2005a] Dean-Leon, E. C.; Garcia-Valdovinos, L. G.; Parra-Vega, V.; Espinosa-Romero, A., "Visual Servoing for Constrained Robots: A New Complete Theoretical Framework and Its Experimental Validation", En *Proceedings of the IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, Monterey, CA, USA, Julio 2005a; pp. 1445-1452.
- [Dean-Leon-2005b] Dean-Leon, E. C.; Garcia, L. G.; Parra-Vega, V.; Espinosa-Romero, A., "Experimental Study on Image-Based Position-Force Adaptive Visual Servoing for Constrained Robots under Jacobian and Dynamic Friction Uncertainties", En *Proceedings of the IEEE International Conference Mechatronics and Automation*, Ontario, Canada, Julio 2005b; pp. 7-12.
- [Dementhon-1995] Dementhon, D. F.; Davis, L. S., "Model-Based Object Pose in 25 Lines of Code". *International Journal of Computer Vision*, 15(1-2) pp. 123-141, 1995.
- [Deng-2005] Deng, L.; Janabi-Sharifi, F.; Hassanzadeh, I., "Comparison of Combined Vision/Force Control Strategies for Robot Manipulators", En *Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering*, Sapporo, Japan, 2005; pp. 2-12.
- [Dickmanns-1988] Dickmanns, E. D.; Graefe, V., "Applications of Dynamic Monocular Machine Vision". *Machine Vision and Applications*, 1(4) pp. 241-261, 1988.
- [Dionnet-2009] Dionnet, F.; Marchand, E., "Stereo Tracking and Servoing for Space Applications". *Advanced Robotics*, 23(5) pp. 579-599, 2009.
- [Diosi-2007] Diosi, A.; Remazeilles, A.; Segvic, S.; Chaumette, F., "Outdoor Visual Path Following Experiments", En *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, San Diego, CA, USA, Octubre 2007; pp. 4265-4270.
- [Dornaika-1995] Dornaika, F. "Contributions À L'intégration Vision Robotique : Calibrage, Localisation Et Asservissement". Tesis, Institut National Polytechnique de Grenoble, 1995.
- [Echegoyen-2007] Echegoyen, Z.; d'Anjou, A.; Grana, M., "Modeling a Legged Robot for Visual Servoing", En *Proceedings of the International Conference on*



Computational Science and Its Applications, Kuala Lumpur, Malaysia, Agosto 2007; pp. 798-810.

- [Fassi-2005] Fassi, I.; Legnani, G., "Hand to Sensor Calibration: A Geometrical Interpretation of the Matrix Equation  $AX=XB$ ". *Journal of Robotic Systems*, 22(9) pp. 497-506, 2005.
- [Faugueras-1998] Faugueras, O.; Lustman, F., "Motion and Structure from Motion in a Piecewise Planar Environment". *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2(3) pp. 485-508, 1998.
- [Feddema-1998] Feddema, J.; Simon, R., "Microassembly of Micro-Electro-Mechanical Systems (Mems) Using Visual Servoing". En *The Confluence of Vision and Control*, D. J. Kriegman, G. D. Hager and A. S. Morse, Eds.; Springer-Verlag: London, 1998; pp. 257-272.
- [Fei-2006] Fei, L.; Hualong, X.; Xinhe, X., "Uncalibrated Direct Visual Servoing Based on State Estimation", En *Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, Luoyang, People R China, Junio 2006; pp. 1521-1525.
- [Felzenszwalb-2005] Felzenszwalb, P.; Huttenlocher, D., "Pictorial Structures for Object Recognition". *Int. J. Comput. Vision*, 61(1) pp. 55-79, 2005.
- [Fioravanti-2009] Fioravanti, D.; Colombo, C.; Allotta, B., "Self-Calibrated Visual Servoing with Respect to Axial-Symmetric 3d Objects". *Robotics and Autonomous Systems*, 57(4) pp. 451-459, 2009.
- [Fischler-1981] Fischler, M.; Bolles, R., "Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography". *Commun. ACM*, 24(6) pp. 381-395, 1981.
- [Fraile-2008] Fraile, J. C.; Perez-Turiel, J.; Gonzalez-Sanchez, J. L.; Lopez-Cruzado, J.; Rodriguez, J. L., "Experiences in the Development of a Robotic Application with Force Control for Bone Drilling". *Revista Iberoamericana De Automatica E Informatica Industrial*, 5(2) pp. 93-106, Apr 2008.
- [Galvez-2003] Galvez, J. A.; Estremera, J.; de Santos, P. G., "A New Legged-Robot Configuration for Research in Force Distribution". *Mechatronics*, 13(8-9) pp. 907-932, 2003.
- [Gangloff-1998] Gangloff, J. A.; De Mathelin, M.; Abba, G., "6 Dof High Speed Dynamic Visual Servoing Using Gpc Controllers", En *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Leuven, Belgium, Mayo 1998; pp. 2008-2013.
- [GarciaGJ-2004a] Garcia, G. J.; Pomares, J.; Torres, F., "Control Visual De Robots Manipuladores. Una Herramienta Para Su Diseño Y Aprendizaje", En *Proceedings de las XXV Jornadas de Automática*, Ciudad Real, Spain, Septiembre 2004; pp. 120-127.
- [GarciaGJ-2004b] Garcia, G. J. (2004). "ViSeC." Fecha última consulta: Febrero 2010, disponible en: <http://disclab.ua.es/cv0304Omron/index.html>.

- [GarciaGJ-2005] Garcia, G. J.; Pomares, J.; Torres, F., "Control Visual Flexible Empleando Momentos Invariantes", En Proceedings de las XXVI Jornadas de Automática, Alicante, Spain, Septiembre 2005; pp. 587-592.
- [GarciaGJ-2006] Garcia, G. J.; Payá, L.; Pomares, J.; Torres, F., "Sistema De Simulación Y Evaluación De Tareas De Control Visual Basado En Control Visual Virtual", En Proceedings de las XXVII Jornadas de Automática, Almería, Spain, Septiembre 2006; pp. 524-530.
- [GarciaGJ-2007a] Garcia, G. J.; Pomares, J.; Torres, F., "Robot Guidance by Estimating the Force-Image Interaction Matrix", En Proceedings of the 8th IFAC International Workshop on Intelligent Manufacturing Systems, Alicante, Spain, Mayo 2007a; pp. 132-137.
- [GarciaGJ-2007b] Garcia, G. J.; Pomares, J.; Torres, F., "Control Visual Para El Seguimiento Intemporal De Trayectorias Empleando El Espacio De Normas De La Matriz De Homografía 2D", En Proceedings de las XXVIII Jornadas de Automática, Huelva, Spain, Septiembre 2007b; pp. 310-318.
- [GarciaGJ-2007c] Garcia, G. J.; Pomares, J.; Torres, F., "A New Time-Independent Image Path Tracker to Guide Robots Using Visual Servoing", En Proceedings of the 12th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, Patras, Greece, Septiembre 2007c; pp. 957-964.
- [GarciaGJ-2009a] Garcia, G. J.; Corrales, J. A.; Pomares, J.; Candelas, F. A.; Torres, F., "Visual Servoing Path Tracking for Safe Human-Robot Interaction", En Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics, Malaga, Spain, Abril 2009; pp. 672-678.
- [GarciaGJ-2009b] Garcia, G. J.; Corrales, J. A.; Pomares, J.; Torres, F., "Survey of Visual and Force/Tactile Control of Robots for Physical Interaction in Spain". Sensors, 9(12) pp. 9689-9733, 2009.
- [GarciaGJ-2009c] Garcia, G. J.; Pomares, J.; Gil, P.; Torres, F., "Seguimiento Intemporal de Trayectorias en la Imagen Basado en Control Visual Dinámico", En Proceedings de las XXX Jornadas de Automática, Valladolid, Spain, Septiembre 2009.
- [GarciaGJ-2009d] Garcia, G. J.; Pomares, J.; Torres, F., "Automatic Robotic Tasks in Unstructured Environments Using an Image Path Tracker". Control Engineering Practice, 17(5) pp. 597-608, Mayo 2009.
- [Garcia]G-2005a] Garcia, J. G.; Robertsson, A.; Ortega, J. G.; Johansson, R., "Sensor Fusion for Compliant Robot Motion Control", En Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Barcelona, Spain, Abril 2005a; pp. 430-441.
- [Garcia]G-2005b] Garcia, J. G.; Robertsson, A.; Ortega, J. G.; Johansson, R., "Automatic Calibration Procedure for a Robotic Manipulator Force Observer", En Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Barcelona, Spain, Abril 2005b; pp. 2703-2708.

- [Garcia]G-2007a]** Garcia, J. G.; Ortega, J. G.; Nieto, L. N.; Garcia, A. S., "Design and Validation of an Open Architecture for an Industrial Robot", En Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Vigo, Spain, Junio 2007a; pp. 2004-2009.
- [Garcia]G-2007b]** Garcia, J. G.; Robertsson, A.; Ortega, J. G.; Johansson, R., "Contact Force Estimation for Complaint Robot Motion Control". Revista Iberoamericana De Automatica E Informatica Industrial, 4(1) pp. 70-82, Enero 2007b.
- [Garcia]G-2009]** Garcia, J. G.; Robertsson, A.; Ortega, J. G.; Johansson, R., "Self-Calibrated Robotic Manipulator Force Observer". Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 25(2) pp. 366-378, Abril 2009.
- [Garcia]N-2002]** Garcia, N.; Mamani, G.; Reinoso, O.; Nasisi, O.; Aracil, R.; Carelli, R., "Visual Servo Control of Industrial Robot Manipulator", En Proceedings of the IFAC World Congress on Automatic Control, Barcelona, Spain, Julio 2002.
- [Garcia]N-2005a]** Garcia, N.; Malis, E.; Aracil, R.; Perez, C., "Continuous Visual Servoing Despite the Changes of Visibility in Image Features", En Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Barcelona, Spain, Abril 2005a; pp. 1214-1220.
- [Garcia]N-2005b]** Garcia, N.; Malis, E.; Aracil, R.; Perez, C., "Continuous Visual Servoing Despite the Changes of Visibility in Image Features". Robotics, IEEE Transactions on, 21(6) pp. 1214-1220, 2005b.
- [Garcia]N-2005c]** Garcia, N.; Reinoso, O.; Malis, E.; Aracil, R., "Parameters Selection and Stability Analysis of Invariant Visual Servoing with Weighted Features", En Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Barcelona, Spain, Abril 2005c; pp. 3492-3497.
- [Gil-2006]** Gil, P.; Torres, F.; Reinoso, O., "A Detection Method of Intersections for Determining Overlapping Using Active Vision", En Proceedings of the International Conference on Computer Vision Theory and Applications, Setúbal, Portugal, Febrero 2006; pp. 501-507.
- [Gil-2009]** Gil, P.; Pomares, J.; Puente, S. T.; Candelas, F.; Garcia, G. J.; Corrales, J. A.; Torres, F., "A Cooperative Robotic System Based on Multiple Sensors to Construct Metallic Structures". The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 45(5) pp. 616-630, 2009.
- [Ginhoux-2005]** Ginhoux, R.; Gangloff, J.; de Mathelin, M.; Soler, L.; Sanchez, M. M. A.; Marescaux, J., "Active Filtering of Physiological Motion in Robotized Surgery Using Predictive Control". Robotics, IEEE Transactions on, 21(1) pp. 67-79, 2005.
- [Grosso-1996]** Grosso, E.; Metta, G.; Oddera, A.; Sandini, G., "Robust Visual Servoing in 3-D Reaching Tasks". Robotics and Automation, IEEE Transactions on, 12(5) pp. 732-742, 1996.
- [Guo-Qing-1997]** Guo-Qing, W.; Arbter, K.; Hirzinger, G., "Real-Time Visual Servoing for Laparoscopic Surgery. Controlling Robot Motion with Color Image

- Segmentation". *Engineering in Medicine and Biology Magazine, IEEE*, 16(1) pp. 40-45, 1997.
- [Hadj-Abdelkader-2008]** Hadj-Abdelkader, H.; Mezouar, Y.; Martinet, P.; Chaumette, F., "Catadioptric Visual Servoing from 3-D Straight Lines". *Robotics, IEEE Transactions on*, 24(3) pp. 652-665, Jun 2008.
- [Harrell-1989]** Harrell, R. C.; Slaughter, D. C.; Adsit, P. D., "A Fruit-Tracking System for Robotic Harvesting". *Machine Vision and Applications*, 2(2) pp. 69-80, 1989.
- [Hartley-2003]** Hartley, R.; Zisserman, A., "Multiple View Geometry in Computer Vision". 2 ed.; Cambridge University Press: Cambridge, United Kingdom, 2003; pp. 655.
- [Hashimoto-1992]** Hashimoto, H.; Kubota, T.; Sato, M.; Harashima, F., "Visual Control of Robotic Manipulator Based on Neural Networks". *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 39(6) pp. 490-496, 1992.
- [Hashimoto-1994]** Hashimoto, K., "Visual Servoing: Real-Time Control of Robot Manipulators Based on Visual Sensory Feedback". World Scientific Pub Co Inc: 1994; p. 300.
- [Hashimoto-1996]** Hashimoto, K.; Ebine, T.; Kimura, H., "Visual Servoing with Hand-Eye Manipulator - Optimal Control Approach". *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, 12(5) pp. 766-774, 1996.
- [Hassanzadeh-2005]** Hassanzadeh, I.; Janabi-Sharifi, F., "An Open Architecture for Hybrid Force-Visual Servo Control of Robotic Manipulators in Unstructured Environments", En Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering, Sapporo, Japan, Diciembre 2005; pp. 1-9.
- [Hemayed-2003]** Hemayed, E. E., "A Survey of Camera Self-Calibration", En Proceedings of the IEEE Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance, Miami, FL, USA, Julio 2003; pp. 351-357.
- [Hill-1979]** Hill, J.; Park, W. T., "Real Time Control of a Robot with a Mobile Camera", En Proceedings of the 9th. International Symposium on Industrial Robots, Washington, DC, USA, Marzo 1979; pp. 233-246.
- [Hogan-1985]** Hogan, N., "Impedance Control - an Approach to Manipulation. I - Theory. II - Implementation. III - Applications". *ASME Transactions Journal of Dynamic Systems and Measurement Control B*, 107 pp. 1-24, 1985.
- [Hollinghurst-1994]** Hollinghurst, N. J.; Cipolla, R., "Uncalibrated Stereo Hand-Eye Coordination". *Image and Vision Computing*, 12(3) pp. 187-192, 1994.
- [Horaud-1997]** Horaud, R.; Dornaika, F.; Lamiroy, B., "Object Pose: The Link between Weak Perspective, Paraperspective, and Full Perspective". *International Journal of Computer Vision*, 22(2) pp. 173-189, 1997.
- [Hosoda-1994]** Hosoda, K.; Asada, M., "Versatile Visual Servoing without Knowledge of True Jacobian", En Proceedings of the IEEE/RSJ/GI International Conference on Intelligent Robots and Systems 'Advanced Robotic Systems and the Real World', Munich, Germany, Septiembre 1994; pp. 186-193.

- [Hosoda-1995]** Hosoda, K.; Sakamoto, K.; Asada, M., "Trajectory Generation for Obstacle Avoidance of Uncalibrated Stereo Visual Servoing without 3d Reconstruction", En Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Pittsburgh, PE, USA, Agosto 1995; pp. 29-34.
- [Hosoda-1998]** Hosoda, K.; Igarashi, K.; Asada, M., "Adaptive Hybrid Control for Visual and Force Servoing in an Unknown Environment". Robotics & Automation Magazine, IEEE, 5(4) pp. 39-43, 1998.
- [Huang-2007]** Huang, H.; Sun, D.; Mills, J. K.; Li, W. J., "Visual-Based Impedance Force Control of Three-Dimensional Cell Injection System", En Robotics and Automation, 2007 IEEE International Conference on, Roma, Italy, Abril 2007; pp. 4196-4201.
- [Hutchinson-1996]** Hutchinson, S.; Hager, G. D.; Corke, P. I., "A Tutorial on Visual Servo Control". Robotics and Automation, IEEE Transactions on, 12(5) pp. 651-670, 1996.
- [Isidori-1995]** Isidori, A., "Nonlinear Control Systems". Springer-Verlag New York, Inc.: 1995; pp. 549.
- [Iwatsuki-2005]** Iwatsuki, M.; Okiyama, N., "A New Formulation of Visual Servoing Based on Cylindrical Coordinate System". Robotics, IEEE Transactions on, 21(2) pp. 266-273, 2005.
- [Jagersand-1997]** Jagersand, M.; Fuentes, O.; Nelson, R., "Experimental Evaluation of Uncalibrated Visual Servoing for Precision Manipulation", En Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Albuquerque, NM, USA, Abril 1997; pp. 2874-2880.
- [Janabi-Sharifi-1997]** Janabi-Sharifi, F.; Wilson, W. J., "Automatic Selection of Image Features for Visual Servoing". Robotics and Automation, IEEE Transactions on, 13(6) pp. 890-903, 1997.
- [Jorg-2000]** Jorg, S.; Langwald, J.; Stelter, J.; Hirzinger, G.; Natale, C., "Flexible Robot-Assembly Using a Multi-Sensory Approach", En Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, San Francisco, CA, USA, Abril 2000; pp. 3687-3694.
- [Jorstad-2008]** Jorstad, A.; Burlina, P.; Wang, I. J.; Lucarelli, D.; DeMenthon, D., "Model-Based Pose Estimation by Consensus", En Proceedings of the International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing, Sydney, Australia, Diciembre 2008; pp. 569-574.
- [Kelly-1995]** Kelly, R.; Marquez, A., "Fixed-Eye Direct Visual Feedback Control of Planar Robots". Journal of Systems Engineering, 5(4) pp. 239-248, 1995.
- [Kelly-1996]** Kelly, R., "Robust Asymptotically Stable Visual Servoing of Planar Robots". Robotics and Automation, IEEE Transactions on, 12(5) pp. 759-766, 1996.



- [**Kelly-2000**] Kelly, R.; Carelli, R.; Nasisi, O.; Kuchen, B.; Reyes, F., "Stable Visual Servoing of Camera-in-Hand Robotic Systems". *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, 5(1) pp. 39-48, 2000.
- [**Kelly-2006**] Kelly, R.; Bugarin, E.; Cervantes, I.; Alvarez-Ramirez, J., "Monocular Direct Visual Servoing for Regulation of Manipulators Moving in the 3d Cartesian Space", En *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*, San Diego, CA, USA, 2006; pp. 1782-1787.
- [**Khalil-2002**] Khalil, H., "Nonlinear Systems". Prentice Hall: 2002.
- [**Kim-2007**] Kim, D. H.; Ryu, Y. G.; Chung, M. J., "Stability Analysis of Image-Based Visual Servoing Regarding with Camera Calibration Errors", En *Proceedings of the 13th International Conference on Advanced Robotics*, Jeju, Korea, Agosto 2007; pp. 176-181.
- [**Kinoshita-1994**] Kinoshita, K.; Deguchi, K., "Simultaneous Determination of Camera Pose and Intrinsic Parameters by Visual Servoing", En *Proceedings of the 12th IAPR International Conference on Pattern Recognition - Conference A: Computer Vision & Image Processing*, Jerusalem, Israel, Octubre 1994; pp. 285-289.
- [**Kragic-2001**] Kragic, D.; Christensen, H. I., "Cue Integration for Visual Servoing". *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, 17(1) pp. 18-27, 2001.
- [**Kragic-2002**] Kragic, D.; Petersson, L.; Christensen, H. I., "Visually Guided Manipulation Tasks". *Robotics and Autonomous Systems*, 40(2-3) pp. 193-203, 2002.
- [**Kragic-2003**] Kragic, D.; Christensen, H. I., "Robust Visual Servoing". *The International Journal of Robotics Research*, 22(10-11) pp. 923-939, 2003.
- [**Krupa-2009**] Krupa, A.; Fichtinger, G.; Hager, G. D., "Real-Time Motion Stabilization with B-Mode Ultrasound Using Image Speckle Information and Visual Servoing". *International Journal of Robotics Research*, 28(10) pp. 1334-1354, Octubre 2009.
- [**Lawrence-1988**] Lawrence, D. A., "Impedance Control Stability Properties in Common Implementations", En *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Philadelphia, PA, USA, Abril 1988; pp. 1185-1190.
- [**Lee-2004**] Lee, M.; Cohen, I., "Human Upper Body Pose Estimation in Static Images". En *Computer Vision - Eccv 2004*, T. Pajdla and J. Matas, Eds.; Springer-Verlag: Berlin, 2004; Vol. 3022, pp. 126-138.
- [**Leite-2009**] Leite, A. C.; Lizarralde, F.; Hsu, L., "Hybrid Adaptive Vision-Force Control for Robot Manipulators Interacting with Unknown Surfaces". *International Journal of Robotics Research*, 28(7) pp. 911-926, Jul 2009.
- [**Lepetit-2004**] Lepetit, V.; Pilet, J.; Fua, P., "Point Matching as a Classification Problem for Fast and Robust Object Pose Estimation", En *Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Washington, DC, USA, Junio 2004; pp. 244-250.



- [Levenberg-1944]** Levenberg, K., "A Method for the Solution of Certain Non-Linear Problems in Least Squares". Quarterly of Applied Mathematics, 2(2) pp. 164-168, 1944.
- [Li-2001]** Li, P. Y.; Horowitz, R., "Passive Velocity Field Control (Pvfc). Part II. Application to Contour Following". Automatic Control, IEEE Transactions on, 46(9) pp. 1360-1371, 2001.
- [Liang-2008]** Liang, R.-h.; Mao, J.-f., "Hand-Eye Calibration with a New Linear Decomposition Algorithm". Journal of Zhejiang University - Science A, 9(10) pp. 1363-1368, 2008.
- [Lippiello-2003]** Lippiello, V.; Siciliano, B.; Villani, L., "Robust Visual Tracking Using a Fixed Multi-Camera System", En Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Taipei, Taiwan, Septiembre 2003; pp. 3333-3338.
- [Lippiello-2007a]** Lippiello, V.; Siciliano, B.; Villani, L., "Position-Based Visual Servoing in Industrial Multirobot Cells Using a Hybrid Camera Configuration". Robotics, IEEE Transactions on, 23(1) pp. 73-86, 2007a.
- [Lippiello-2007b]** Lippiello, V.; Siciliano, B.; Villani, L., "A Position-Based Visual Impedance Control for Robot Manipulators", En Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Roma, Italy, Abril 2007b; pp. 2068-2073.
- [Lippiello-2007c]** Lippiello, V.; Siciliano, B.; Villani, L., "Robot Force/Position Control with Force and Visual Feedback", En European Control Conference, Kos, Greece, Julio 2007c; pp. 3790-3795.
- [LiuXY-2008]** Liu, X. Y.; Sun, Y., "Visually Servoed Orientation Control of Biological Cells in Microrobotic Cell Manipulation", En Proceedings of the 11th International Symposium on Experimental Robotics (ISER), Athens, Greece, Julio 2008; pp. 179-187.
- [LiuYH-2006]** Liu, Y.-H.; Wang, H.; Wang, C.; Lam, K. K., "Uncalibrated Visual Servoing of Robots Using a Depth-Independent Interaction Matrix". Robotics, IEEE Transactions on, 22(4) pp. 804-817, 2006.
- [LopezG-2006]** Lopez, G.; Sagues, C.; Guerrero, J. J.; Kragic, D.; Jensfelt, P., "Nonholonomic Epipolar Visual Servoing", En Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Orlando, FL, USA, Mayo 2006; pp. 2378-2384.
- [LopezG-2007]** Lopez, G.; Bhattacharya, S.; Guerrero, J. J.; Sagues, C.; Hutchinson, S., "Switched Homography-Based Visual Control of Differential Drive Vehicles with Field-of-View Constraints", En Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Rome, Italy, Abril 2007; pp. 4238-4244.

- [LopezG-2008] Lopez, G.; Sagues, C.; Guerrero, J. J.; Kragic, D.; Jensfelt, P., "Switching Visual Control Based on Epipoles for Mobile Robots". *Robotics and Autonomous Systems*, 56(7) pp. 592-603, 2008.
- [LopezJ-2002] Lopez, J.; Pedreno-Molina, J. L.; Guerrero-Gonzalez, A.; Gorce, P., "A Neural Model for Visual-Tactile-Motor Integration in Robotic Reaching and Grasping Tasks". *Robotica*, 20(01) pp. 23-31, 2002.
- [Lots-2001] Lots, J. F.; Lane, D. M.; Trucco, E.; Chaumette, F., "A 2d Visual Servoing for Underwater Vehicle Station Keeping", En *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2001, Seoul, Korea, Mayo 2001; pp. 2767-2772.
- [Lotufo-2001] Lotufo, R. A.; Zampiroli, F. A., "Fast Multidimensional Parallel Euclidean Distance Transform Based on Mathematical Morphology", En *Proceedings of the XIV Brazilian Symposium on Computer Graphics and Image Processing*, Florianopolis, Brazil, Octubre 2001; pp. 100-105.
- [Lowe-1987] Lowe, D. G., "Three-Dimensional Object Recognition from Single Two-Dimensional Images". *Artificial Intelligence*, 31(3) pp. 355-395, 1987.
- [Lucchese-2006] Lucchese, L., "Closed-Form Pose Estimation from Metric Rectification of Coplanar Points". *IEE Proceedings - Vision, Image, and Signal Processing*, 153(3) pp. 364-378, 2006.
- [Lyapunov-1892] Lyapunov, A. M. "El Problema General De La Estabilidad Del Movimiento (En Ruso)". Tesis, 1892.
- [Malis-1999] Malis, E.; Chaumette, F.; Boudet, S., "2d 1/2 Visual Servoing". *Robotics and Automation*, *IEEE Transactions on*, 15(2) pp. 234-246, 1999.
- [Malis-2001] Malis, E.; Morel, G.; Chaumette, F., "Robot Control Using Disparate Multiple Sensors". *The International Journal of Robotics Research*, 20(5) pp. 364-377, 2001.
- [Malis-2003a] Malis, E.; Rives, P., "Robustness of Image-Based Visual Servoing with Respect to Depth Distribution Errors", En *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Taipei, Taiwan, Septiembre 2003a; pp. 1056-1061.
- [Malis-2003b] Malis, E.; Rives, P., "Uncalibrated Active Affine Reconstruction Closing the Loop by Visual Servoing", En *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Las Vegas, NE, USA, Octubre 2003b; pp. 498-503.
- [Malis-2004a] Malis, E., "Improving Vision-Based Control Using Efficient Second-Order Minimization Techniques", En *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, New Orleans, LA, USA, Mayo 2004a; pp. 1843-1848.
- [Malis-2004b] Malis, E., "Visual Servoing Invariant to Changes in Camera-Intrinsic Parameters". *Robotics and Automation*, *IEEE Transactions on*, 20(1) pp. 72-81, 2004b.

- [**Mansard-2009**] Mansard, N.; Khatib, O.; Kheddar, A., "A Unified Approach to Integrate Unilateral Constraints in the Stack of Tasks". *Robotics, IEEE Transactions on*, 25(3) pp. 670-685, Junio 2009.
- [**Marchand-1996**] Marchand, E.; Rizzo, A.; Chaumette, F., "Avoiding Robot Joint Limits and Kinematic Singularities in Visual Servoing", En *Proceedings of the 13th International Conference on Pattern Recognition*, Vienna, Austria, Agosto 1996; pp. 297-301.
- [**Marchand-2001**] Marchand, E.; Chaumette, F., "A New Formulation for Non-Linear Camera Calibration Using Virtual Visual Servoing"; Research Report no.1366; IRISA: Rennes, 2001.
- [**Marchand-2005**] Marchand, E.; Chaumette, F., "Feature Tracking for Visual Servoing Purposes". *Robotics and Autonomous Systems*, 52(1) pp. 53-70, 2005.
- [**Mariottini-2006**] Mariottini, G.; Alunno, E.; Piazzzi, J.; Prattichizzo, D., "Visual Servoing with Central Catadioptric Camera". En *Current Trends in Nonlinear Systems and Control*, L. Menini, L. Zaccarian and C. T. Abdallah, Eds.; Birkhäuser: Boston, 2006; pp. 309-325.
- [**Mariottini-2008**] Mariottini, G. L.; Prattichizzo, D., "Image-Based Visual Servoing with Central Catadioptric Cameras". *International Journal of Robotics Research*, 27(1) pp. 41-56, 2008.
- [**Marquardt-1963**] Marquardt, D., "An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters". *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 11(2) pp. 431-441, 1963.
- [**Martinet-1999**] Martinet, P.; Gallice, J., "Position Based Visual Servoing Using a Non-Linear Approach", En *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Kyongju, South Korea, Octubre 1999; pp. 531-536.
- [**Martinet-2000**] Martinet, P.; Thibaud, C., "Automatic Guided Vehicles: Robust Controller Design in Imagespace". *Auton. Robots*, 8(1) pp. 25-42, 2000.
- [**Mebarki-2008**] Mebarki, R.; Krupa, A.; Chaumette, F., "Image Moments-Based Ultrasound Visual Servoing", En *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Pasadena, CA, USA, Mayo 2008; pp. 113-119.
- [**Mejias-2006a**] Mejias, L.; Campoy, P.; Saripalli, S.; Sukhatme, G. S., "A Visual Servoing Approach for Tracking Features in Urban Areas Using an Autonomous Helicopter", En *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Orlando, FL, USA, Mayo 2006a; pp. 2503-2508.
- [**Mejias-2006b**] Mejias, L.; Saripalli, S.; Campoy, P.; Sukhatme, G. S., "Visual Servoing of an Autonomous Helicopter in Urban Areas Using Feature Tracking". *Journal of Field Robotics*, 23(3-4) pp. 185-199, Mar-Apr 2006b.
- [**Mejias-2007**] Mejias, L.; Correa, J. F.; Mondragon, I.; Campoy, P., "Colibri: A Vision-Guided Uav for Surveillance and Visual Inspection", En *Proceedings of the*

- IEEE International Conference on Robotics and Automation, Rome, Italy, Abril 2007; pp. 2760-2761.
- [Merino-2006]** Merino, L.; Wiklund, J.; Caballero, F.; Moe, A.; De Dios, J. R. M.; Forssen, P. E.; Nordberg, K.; Ollero, A., "Vision-Based Multi-Uav Position Estimation". *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 13(3) pp. 53-62, 2006.
- [Merritt-1997]** Merritt, P. H.; Kramer, M. A., "Field Test of Active Tracking of a Ballistic Missile in the Boost Phase", En *Proceedings of SPIE*, 3086, Orlando, FL, USA, 1997; pp. 2-9.
- [Mezouar-2002a]** Mezouar, Y.; Chaumette, F., "Avoiding Self-Occlusions and Preserving Visibility by Path Planning in the Image". *Robotics and Autonomous Systems*, 41(2-3) pp. 77-87, 2002a.
- [Mezouar-2002b]** Mezouar, Y.; Chaumette, F., "Path Planning for Robust Image-Based Control". *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, 18(4) pp. 534-549, 2002b.
- [Mezouar-2003]** Mezouar, Y.; Chaumette, F., "Optimal Camera Trajectory with Image-Based Control". *The International Journal of Robotics Research*, 22(10-11) pp. 781-803, 2003.
- [Mezouar-2009]** Mezouar, Y., "Optimal Camera Trajectory under Visibility Constraint in Visual Servoing: A Variational Approach". *Advanced Robotics*, 23(12-13) pp. 1817-1827, 2009.
- [Miyazaki-1990]** Miyazaki, F.; Masutani, Y., "Robustness of Sensory Feedback Control Based on Imperfect Jacobian", En *Proceedings of the fifth international symposium on Robotics research*, 1990; pp. 201-208.
- [Montes-2004]** Montes, H.; Nabulsi, S.; Armada, M. A., "Reliable, Built-in, High-Accuracy Force Sensing for Legged Robots", En *Proceedings of the 7th International Conference on Climbing and Walking Robots*, Madrid, Spain, Septiembre 2004; pp. 931-950.
- [Montijano-2008]** Montijano, E.; Sagues, C., "Position-Based Navigation Using Multiple Homographies", En *Proceedings of the 13th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*, Hamburg, Germany, Septiembre 2008; pp. 994-1001.
- [Morel-1998]** Morel, G.; Malis, E.; Boudet, S., "Impedance Based Combination of Visual and Force Control", En *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Leuven, Belgium, Mayo 1998; pp. 1743-1748.
- [Mut-2000]** Mut, V.; Nasisi, O.; Carelli, R.; Kuchen, B., "Tracking Adaptive Impedance Robot Control with Visual Feedback". *Robotica*, 18(4) pp. 369-374, 2000.
- [Nabulsi-2009]** Nabulsi, S.; Sarria, J. F.; Montes, H.; Armada, M. A., "High-Resolution Indirect Feet-Ground Interaction Measurement for Hydraulic-Legged Robots". *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, 58(10) pp. 3396-3404, 2009.

- [Nakabo-1998] Nakabo, Y.; Ishikawa, M., "Visual Impedance Using 1 Ms Visual Feedback System", En Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Leuven, Belgium, Mayo 1998; pp. 2333-2338.
- [Namiki-1999] Namiki, A.; Nakabo, Y.; Ishii, I.; Ishikawa, M., "High Speed Grasping Using Visual and Force Feedback", En Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Detroit, MI, USA, Mayo 1999; pp. 3195-3200.
- [Nasisi-2003] Nasisi, O.; Carelli, R., "Adaptive Servo Visual Robot Control". Robotics and Autonomous Systems, 43(1) pp. 51-78, 2003.
- [Nelson-1993] Nelson, B. J.; Papanikolopoulos, N. P.; Khosla, P. K., "Visual Servoing for Robotic Assembly". En Visual Servoing-Real-Time Control of Robot Manipulators Based on Visual Sensory Feedback, K. Hashimoto, Ed. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.: River Edge, 1993; pp. 139-164.
- [Nelson-1996a] Nelson, B. J.; Khosla, P. K., "Force and Vision Resolvability for Assimilating Disparate Sensory Feedback". Robotics and Automation, IEEE Transactions on, 12(5) pp. 714-731, 1996a.
- [Nelson-1996b] Nelson, B. J.; Morrow, J.; Khosla, P. K., "Robotic Manipulation Using High Bandwidth Force and Vision Feedback". Mathematical and Computer Modelling - An International Journal, 24(5-6) pp. 11-29, 1996b.
- [Nelson-1997] Nelson, B. J.; Zhou, Y.; Vikramaditya, B., "Integrating Force and Vision Feedback for Microassembly", En Proceedings of SPIE: Microrobotics and Microsystems Fabrication, Pittsburgh, PA, USA, Octubre 1997; pp. 30-41.
- [Nelson-2001] Nelson, B. J., "Assimilating Disparate Sensory Feedback within Virtual Environments for Telerobotic Systems". Robotics and Autonomous Systems, 36(1) pp. 1-10, 2001.
- [Nematollahi-2009] Nematollahi, E.; Janabi-Sharifi, F., "Generalizations to Control Laws of Image-Based Visual Servoing". International Journal of Optomechatronics, 3(3) pp. 167-186, 2009.
- [Nomura-1996] Nomura, Y.; Zhang, D.; Sakaida, Y.; Fujii, S., "3-D Object Pose Estimation by Shading and Edge Data Fusion - Simulating Virtual Manipulation on Mental Images", En Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, San Francisco, CA, USA, Junio 1996; pp. 866-871.
- [Oberkampf-1996] Oberkampf, D.; DeMenthon, D. F.; Davis, L. S., "Iterative Pose Estimation Using Coplanar Feature Points". Computer Vision and Image Understanding, 63(3) pp. 495-511, 1996.
- [Ogata-2001] Ogata, K., "Modern Control Engineering". Prentice Hall PTR: 2001; pp. 964.
- [Oku-2000] Oku, H.; Ishii, I.; Ishikawa, M., "Tracking a Protozoon Using High-Speed Visual Feedback", En Proceedings of the 1st Annual International Conference



- On Microtechnologies in Medicine and Biology, Lyon, France, Octubre 2000; pp. 156-159.
- [Olsson-2002]** Olsson, T.; Bengtsson, J.; Johansson, R.; Malm, H., "Force Control and Visual Servoing Using Planar Surface Identification", En Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Washington, DC, USA, Mayo 2002; pp. 4211-4216.
- [Ortiz-2002]** Ortiz, A.; Simo, M.; Oliver, G., "A Vision System for an Underwater Cable Tracker". Mach. Vision Appl., 13(3) pp. 129-140, 2002.
- [Pages-2004]** Pages, J.; Collewet, C.; Chaumette, F.; Salvi, J., "Plane-to-Plane Positioning from Image-Based Visual Servoing and Structured Light", En Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Sendai, Japan, Septiembre 2004; pp. 1004-1009 vol.1001.
- [Pages-2005a]** Pages, J.; Collewet, C.; Chaumette, F.; Salvi, J., "Robust Decoupled Visual Servoing Based on Structured Light", En Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Edmonton, Canada, Agosto 2005a; pp. 2676-2681.
- [Pages-2005b]** Pages, J.; Collewet, C.; Chaumette, F.; Salvi, J., "Optimizing Plane-to-Plane Positioning Tasks by Image-Based Visual Servoing and Structured Light", En Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Edmonton, Canada, Agosto 2005b; pp. 1000-1010.
- [Papanikolopoulos-1992]** Papanikolopoulos, N. P.; Khosla, P. K., "Shared and Traded Telerobotic Visual Control", En Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Nice, France, Mayo 1992; pp. 878-885.
- [Pari-2006]** Pari, L.; Sebastian, J. M.; Gonzalez, C.; Angel, L., "Image Based Visual Servoing: A New Method for the Estimation of the Image Jacobian in Dynamic Environments", En Proceedings of the 3rd International Conference on Image Analysis and Recognition, Povia de Varzim, Portugal, Septiembre 2006; pp. 850-861.
- [Pari-2008]** Pari, L.; Sebastian, J. M.; Traslosheros, A.; Angel, L., "Image Based Visual Servoing: Estimated Image Jacobian by Using Fundamental Matrix Vs Analytic Jacobian", En Proceedings of the 5th International Conference on Image Analysis and Recognition, Povia de Varzim, Portugal, Junio 2008; pp. 706-717.
- [Park-2003]** Park, J. S.; Chung, M. J., "Path Planning with Uncalibrated Stereo Rig for Image-Based Visual Servoing under Large Pose Discrepancy". Robotics and Automation, IEEE Transactions on, 19(2) pp. 250-258, 2003.
- [Pavlidis-1996]** Pavlidis, I.; Papanikolopoulos, N. P., "Automatic Selection of Control Points for Deformable-Model-Based Target Tracking", En Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Minneapolis, MI, USA, Abril 1996; pp. 2915-2920.



- [Payo-2009]** Payo, I.; Feliu, V.; Cortazar, O. D., "Force Control of a Very Lightweight Single-Link Flexible Arm Based on Coupling Torque Feedback". *Mechatronics*, 19(3) pp. 334-347, Apr 2009.
- [Pedreño-2000]** Pedreño, J. L.; Guerrero-Gonzalez, A.; Lopez-Coronado, J., "A Neural Controller for a Robotic Hand with Artificial Tactile Skins in Grasping Tasks", En *Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, Nashville, TE, USA, Octubre 2000; pp. 161-165
- [PerezC-2006a]** Perez, C.; García, N.; Reinoso, O.; Azorín, J. M.; Morales, R., "Design, Modeling and Identification of a Cartesian Robot for Direct Visual Servoing Applications", En *Proceedings of the 6th IASTED International Conference on Visualization, Imaging, and Image Processing*, Palma de Mallorca, Spain, Agosto 2006a; pp. 477-481.
- [PerezC-2006b]** Perez, C.; Morales, R.; Garcia-Aracil, N.; Azorin, J. M.; Sabater, J. M., "The Visibility Problem in Visual Servoing", En *Proceedings of the 3rd International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics*, Setubal, Portugal, Agosto 2006b; pp. 482-485.
- [PerezC-2007]** Perez, C.; Garcia, N.; Sabater, J. M.; Azorin, J. M.; Reinoso, O.; Gracia, L., "Improvement of the Visual Servoing Task with a New Trajectory Predictor - the Fuzzy Kalman Filter", En *Proceedings of the 4th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics*, Angers, France, Mayo 2007; pp. 133-140.
- [PerezC-2009]** Perez, C.; Gracia, L.; Garcia, N.; Cervera, E., "Visual Control of Robots with Delayed Images". *Advanced Robotics*, 23(6) pp. 725-745, 2009.
- [PerezRR-2009]** Perez, R. R.; Arteaga, M. A.; Kelly, R.; Espinosa, A., "On Output Regulation of Direct Visual Servoing Via Velocity Fields". *International Journal of Control*, 82(4) pp. 679-688, 2009.
- [Perrin-2003]** Perrin, D. P.; Kadioglu, E.; Stoeter, S. A.; Papanikolopoulos, N., "Grasping and Tracking Using Constant Curvature Dynamic Contours". *The International Journal of Robotics Research*, 22(10-11) pp. 855-871, 2003.
- [Phong-1993]** Phong, T. Q.; Horaud, R.; Yassine, A.; Pham, D. T., "Optimal Estimation of Object Pose from a Single Perspective View", En *Proceedings of the Fourth International Conference on Computer Vision*, Berlin, Germany, Mayo 1993; pp. 534-539.
- [Pichler-2000]** Pichler, A.; Jagersand, M., "Uncalibrated Hybrid Force-Vision Manipulation", En *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Takamatsu, Japan, Octubre 2000; pp. 1866-1871.
- [Piepmeier-2003]** Piepmeier, J. A.; Lipkin, H., "Uncalibrated Eye-in-Hand Visual Servoing". *The International Journal of Robotics Research*, 22(10-11) pp. 805-819, 2003.

- [Piepmeier-2004] Piepmeier, J. A.; McMurray, G. V.; Lipkin, H., "Uncalibrated Dynamic Visual Servoing". *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, 20(1) pp. 143-147, 2004.
- [Pomares-2002] Pomares, J.; Gil, P.; Torres, F., "2d Visual Servoing with Integration of Multiple Predictions of Movement Based on Kalman Filter", En *Proceedings of the 15th IFAC World Congress, Barcelona, Spain, Julio 2002*; pp. 12-16.
- [Pomares-2003] Pomares, J.; Torres, F.; Gil, P., "Visual Servoing and Force Control Fusion for Complex Insertion Tasks", En *Proceedings of the 11th International Conference on Advanced Robotics, Coimbra, Portugal, Junio 2003*; pp. 357-362.
- [Pomares-2004a] Pomares, J. "Control Visual 2d Indirecto Para El Seguimiento Intemporal De Trayectorias Y Su Aplicación a Estrategias De Control Visual-Fuerza En Manipuladores". Tesis, University of Alicante, Alicante, 2004a.
- [Pomares-2004b] Pomares, J.; Puente, S. T.; Torres, F.; Candelas, F. A.; Gil, P., "Virtual Disassembly of Products Based on Geometric Models". *Computers in Industry*, 55(1) pp. 1-14, 2004b.
- [Pomares-2004c] Pomares, J.; Torres, F., "Movement Flow-Based Visual Servoing for Tracking Trajectories with Occlusions". *Latin America Transactions, IEEE (Revista IEEE America Latina)*, 2(2) pp. 142-148, 2004c.
- [Pomares-2005a] Pomares, J.; Garcia, G. J.; Paya, L.; Torres, F., "An Uncalibrated Approach to Track Trajectories Using Visual-Force Control", En *Proceedings of the 2nd International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics, Barcelona, Spain, Septiembre 2005a*; pp. 103-108.
- [Pomares-2005b] Pomares, J.; García, G. J.; Torres, F., "Impedance Control for Fusing Multisensorial Systems in Robotic Manipulation Tasks", En *Proceedings of the WSEAS International Conference on Dynamical Systems and Control, Venice, Italy, Noviembre 2005b*; pp. 357-362.
- [Pomares-2005c] Pomares, J.; Torres, F., "Movement-Flow-Based Visual Servoing and Force Control Fusion for Manipulation Tasks in Unstructured Environments". *Systems Man and Cybernetics Part C-Applications and Reviews, IEEE Transactions on*, 35(1) pp. 4-15, 2005.
- [Pomares-2006a] Pomares, J.; García, G. J.; Payá, L.; Torres, F., "Adaptive Visual Servoing and Force Control Fusion to Track Surfaces". *WSEAS Transactions on Systems*, 5(1) pp. 25-32, 2006.
- [Pomares-2006b] Pomares, J.; Garcia, G. J.; Torres, F., "Improving Tracking Trajectories with Motion Estimation", En *Proceedings of the 3rd International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics, Setubal, Portugal, Agosto 2006b*; pp. 97-103.
- [Pomares-2006c] Pomares, J.; Gil, P.; Garcia, G. J.; Torres, F., "Visual - Force Control and Structured Light Fusion to Improve Recognition of Discontinuities in Surfaces", En *Proceedings of the IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, Praga, Czech Republic, Septiembre 2006c*; pp. 1044-1050.

- [Pomares-2006d] Pomares, J.; Puente, S. T.; Garcia, G. J.; Torres, F., "Multi-Sensorial System for the Generation of Disassembly Trajectories", En Proceedings of the World Automation Congress, Budapest, Hungary, Julio 2006d; pp. 1-6.
- [Pomares-2007a] Pomares, J.; Chaumette, F.; Torres, F., "Adaptive Visual Servoing by Simultaneous Camera Calibration", En Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Rome, Italy, Abril 2007a; pp. 2811-2816.
- [Pomares-2007b] Pomares, J.; Garcia, G. J.; Payá, L.; Torres, F., "An Uncalibrated Approach to Track Trajectories Using Visual-Force Control". En Informatics in Control, Automation and Robotics II, J. Filipe, J.-L. Ferrier, J. A. Cetto and M. Carvalho, Eds.; Springer: Dordrecht, 2007b; pp. 103-108.
- [Pomares-2007c] Pomares, J.; Garcia, G. J.; Torres, F., "A Robust Approach to Control Robot Manipulators by Fusing Visual and Force Information". Journal of Intelligent & Robotic Systems, 48(4) pp. 437-456, Apr 2007c.
- [Pomares-2008] Pomares, J.; Gil, P.; Garcia, G. J.; Sebastian, J. M.; Torres, F., "Improving Detection of Surface Discontinuities in Visual-Force Control Systems". Image Vision Comput., 26(10) pp. 1435-1447, 2008.
- [Pomares-2009] Pomares, J.; Gil, P.; Corrales, J. A.; Garcia, G. J.; Puente, S. T.; Torres, F., "Using Visual and Force Information in Robot-Robot Cooperation to Build Metallic Structures". Journal of Automation, Mobile, Robotics & Intelligent Systems, 3(3) pp. 96-101, 2009.
- [Pomares-2010] Pomares, J.; Candelas, F. A.; Torres, F.; Corrales, J. A.; Garcia, G. J., "Safe Human-Robot Cooperation Based on an Adaptive Time-Independent Image Path Tracker". International Journal of Innovative Computing, Information and Control, 6(8), Aceptado (Fecha de publicación prevista Agosto 2010).
- [Prats-2004] Prats, M.; Ramos-Garijo, R.; Sanz, P. J.; Del Pobil, A. P., "Recent Progress in the Uji Librarian Robot", En Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, The Hague, Netherlands, Octubre 2004; pp. 5227-5232.
- [Prats-2005] Prats, M.; Sanz, P. J.; del Pobil, A. P., "Perception-Based Search and Manipulation in a Semi-Structured Environment", En Proceedings of the 12th International Conference on Advanced Robotics, Seattle, WA, USA, Julio 2005; pp. 749-754.
- [Prats-2007] Prats, M.; Martinet, P.; Del Pobil, A. P.; Lee, S., "Vision/Force Control Task-Oriented Grasping and Manipulation", En Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, San Diego, CA, USA, Octubre 2007; pp. 1320-1325.
- [Prats-2008a] Prats, M.; Martinet, P.; Del Pobil, A. P.; Lee, S., "Robotic Execution of Everyday Tasks by Means of External Vision/Force Control". Intelligent Service Robotics, 1(3) pp. 253-266, 2008a.

- [Prats-2008b] Prats, M.; Wieland, S.; Asfour, T.; Del Pobil, A. P.; Dillmann, R., "Compliant Interaction in Household Environments by the Armar-III Humanoid Robot", En Proceedings of the 8th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, Daejeon, Korea, Diciembre 2008b; pp. 475-480.
- [Prats-2009] Prats, M.; Sanz, P. J.; Pobil, A. P. d., "Vision-Tactile-Force Integration and Robot Physical Interaction", En Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Kobe, Japan, Mayo 2009; pp. 3975-3980
- [Prats-2010] Prats, M.; Sanz, P. J.; del Pobil, A. P., "A Framework for Compliant Physical Interaction". *Autonomous Robots*, 28(1) pp. 89-111, 2010.
- [Pressigout-2005] Pressigout, M.; Marchand, E., "Real Time Planar Structure Tracking for Visual Servoing: A Contour and Texture Approach", En Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Edmonton, Canada, Agosto 2005; pp. 251-256.
- [Puente-2004] Puente, S. T.; Torres, F., "Automatic Screws Removal in a Disassembly Process", En Proceedings of the 1st CLAWAR/EURON Workshop on Robots in Entertainment, Leisure and Hobby, Vienna, Austria, Diciembre 2004; pp. 212-216.
- [Raibert-1981] Raibert, M.; Craig, J., "Hybrid Position/Force Control of Manipulators". *ASME Journal of Dynamics Systems, Measurement and Control*, 102 pp. 126-133, 1981.
- [Recatala-2004] Recatala, G.; Sanz, P. J.; Cervera, E.; del Pobil, A. P., "Filter-Based Control of a Gripper-to-Object Positioning Movement", En Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, The Hague, Netherlands, Octubre 2004; pp. 5423-5428.
- [Remazeilles-2007] Remazeilles, A.; Chaumette, F., "Image-Based Robot Navigation from an Image Memory". *Robotics and Autonomous Systems*, 55(4) pp. 345-356, 2007.
- [Samson-1991] Samson, C.; Espiau, B.; Borgne, M. L., "Robot Control: The Task Function Approach". Oxford University Press: 1991; pp. 384.
- [Sanderson-1980] Sanderson, A. C.; Weiss, L. E., "Image-Based Visual Servo Control Using Relational Graph Error Signals", En Proceedings of the IEEE International Conference on Cybernetics and Society, Cambridge, MA, USA, Octubre 1980; pp. 1074-1077.
- [Santos-2006] Santos, P.; Stork, A.; Buaes, A.; Jorge, J., "Ptrack: Introducing a Novel Iterative Geometric Pose Estimation for a Marker-Based Single Camera Tracking System ", En Proceedings of the IEEE Virtual Reality 2006 Conference Alexandria, VI, USA, Marzo 2006; pp. 143-150.
- [Sattar-2005] Sattar, J.; Giguere, P.; Dudek, G.; Prahacs, C., "A Visual Servoing System for an Aquatic Swimming Robot", En Proceedings of the IEEE/RSJ International

Conference on Intelligent Robots and Systems, Edmonton, Canada, Agosto 2005; pp. 1483-1488.

- [Sauvee-2006]** Sauvee, M.; Poignet, P.; Dombre, E.; Courtial, E., "Image Based Visual Servoing through Nonlinear Model Predictive Control". En Proceedings of the 45th IEEE Conference on Decision and Control, Vols 1-14, IEEE: New York, NJ, USA, 2006; pp. 4347-4352.
- [Sciavicco-2000]** Sciavicco, L.; Siciliano, B.; Sciavicco, B., "Modelling and Control of Robot Manipulators". Springer-Verlag: London, United Kingdom, 2000; pp. 402.
- [Schramm-2004]** Schramm, F.; Morel, G.; Micaelli, A.; Lottin, A., "Extended-2d Visual Servoing", En Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, New Orleans, LA, USA, Abril 2004; pp. 267-273.
- [Schramm-2006]** Schramm, F.; Morel, G., "Ensuring Visibility in Calibration-Free Path Planning for Image-Based Visual Servoing". Robotics, IEEE Transactions on, 22(4) pp. 848-854, 2006.
- [Schramm-2007]** Schramm, F.; Geffard, F.; Morel, G.; Micaelli, A., "Calibration Free Image Point Path Planning Simultaneously Ensuring Visibility and Controlling Camera Path", En Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Rome, Italy, Abril 2007; pp. 2074-2079.
- [Schoorman-2004]** Schoorman, D. C.; Capson, D. W., "Robust Direct Visual Servo Using Network-Synchronized Cameras". Robotics and Automation, IEEE Transactions on, 20(2) pp. 319-334, Apr 2004.
- [Sebastian-2007]** Sebastian, J. M.; Traslosheros, A.; Angel, L.; Roberti, F.; Carelli, R., "Parallel Robot High Speed Object Tracking", En Proceedings of the 4th International Conference on Image Analysis and Recognition, Montreal, Canada, Agosto 2007; pp. 295-306.
- [Sebastian-2009]** Sebastian, J. M.; Pari, L.; Angel, L.; Traslosheros, A., "Uncalibrated Visual Servoing Using the Fundamental Matrix". Robotics and Autonomous Systems, 57(1) pp. 1-10, 2009.
- [Segvic-2009]** Segvic, S.; Remazeilles, A.; Diosi, A.; Chaumette, F., "A Mapping and Localization Framework for Scalable Appearance-Based Navigation". Computer Vision and Image Understanding, 113(2) pp. 172-187, 2009.
- [Sequeira-2004]** Sequeira, P. J.; Mendonça, L. F.; Costa Sousa, J.; Caldas Pinto, J. R., "Fuzzy Model Based Control Applied to Path Planning Visual Servoing". En Progress in Pattern Recognition, Image Analysis and Applications, A. Sanfeliu, J. F. Martínez and J. A. Carrasco, Eds.; Springer-Verlag: Berlin, 2004; Vol. 3287, pp. 224-231.
- [Sequeira-2003]** Sequeira, P. J.; Caldas, J. R., "Dynamic Visual Servoing of Robotic Manipulators", En Proceedings of the IEEE Conference Emerging Technologies and Factory Automation, Lisbon, Portugal, Septiembre 2003; pp. 560-565.
- [Serra-1983]** Serra, J., "Image Analysis and Mathematical Morphology". Academic Press, Inc.: London, United Kingdom, 1983; pp. 610.



- [Shi-2004] Shi, F.; Zhang, X.; Liu, Y., "A New Method of Camera Pose Estimation Using 2d-3d Corner Correspondence". *Pattern Recognition Letters*, 25(10) pp. 1155-1163, 2004.
- [Shirai-1973] Shirai, Y.; Inoue, H., "Guiding a Robot by Visual Feedback in Assembling Tasks". *Pattern Recognition*, 5(2) pp. 99-106, 1973.
- [Shoemake-1985] Shoemake, K., "Animating Rotation with Quaternion Curves". *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, 19(3) pp. 245-254, 1985.
- [Soatto-1996] Soatto, S.; Frezza, R.; Perona, P., "Motion Estimation Via Dynamic Vision". *Automatic Control, IEEE Transactions on*, 41(3) pp. 393-413, 1996.
- [Spong-1989] Spong, M. W., "Robot Dynamics and Control". John Wiley & Sons, Inc.: New York, NY, USA, 1989; pp. 336.
- [Suarez-1995] Suarez, R.; Basanez, L.; Rosell, J., "Using Configuration and Force Sensing in Assembly Task Planning and Execution", En *Proceedings of the IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning*, Pittsburgh, PA, USA, Agosto 1995; pp. 273-279.
- [Suh-1993] Suh, I. H., "Visual Servoing of Robot Manipulators by Fuzzy Membership Function Based Neural Networks". En *Visual Servoing, Robotics and Automated Systems*, K. Hashimoto, Ed. World Scientific Publishing Co.: Singapore, 1993; Vol. 7, pp. 285-315.
- [Tahri-2005] Tahri, O.; Chaumette, F., "Point-Based and Region-Based Image Moments for Visual Servoing of Planar Objects". *Robotics, IEEE Transactions on*, 21(6) pp. 1116-1127, 2005.
- [Tahri-2009] Tahri, O.; Mezouar, Y.; Andreff, N.; Martinet, P., "Omnidirectional Visual-Servo of a Gough-Stewart Platform". *Robotics, IEEE Transactions on*, 25(1) pp. 178-183, 2009.
- [Takegaki-1981] Takegaki, M.; Arimoto, S., "A New Feedback Method for Dynamic Control of Manipulators". *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 103(2) pp. 119-125, 1981.
- [Tatsambon-2007] Tatsambon, R.; Chaumette, F., "Visual Servoing from Spheres Using a Spherical Projection Model", En *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Rome, Italy, Abril 2007; pp. 2080-2085.
- [Tatsambon-2008] Tatsambon, R.; Chaumette, F., "Using Spherical Moments for Visual Servoing from a Special Target with Unique Projection Center Cameras", En *Proceedings of the 10th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision*, Hanoi, Vietnam, Diciembre 2008; pp. 119-124.
- [Tatsambon-2009] Tatsambon, R.; Chaumette, F., "Visual Servoing from Spheres with Paracatadioptric Cameras". En *Recent Progress in Robotics: Viable Robotic Service to Human*, S. Lee, I. H. Suh and M. S. Kim, Eds.; Springer-Verlag: Berlin, 2009; pp. 199-213.



- [**Thayananthan-2008**] Thayananthan, A.; Navaratnam, R.; Stenger, B.; Torr, P. H. S.; Cipolla, R., "Pose Estimation and Tracking Using Multivariate Regression". *Pattern Recogn. Lett.*, 29(9) pp. 1302-1310, 2008.
- [**Thuilot-2002**] Thuilot, B.; Martinet, P.; Cordesses, L.; Gallice, J., "Position Based Visual Servoing: Keeping the Object in the Field of Vision", En *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Washington, DC, USA, Mayo 2002; pp. 1624-1629.
- [**Torres-2004**] Torres, F.; Gil, P.; Puente, S.; Pomares, J.; Aracil, R. "Automatic PC disassembly for component recovery". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 23(1-2) pp. 39-46, 2004.
- [**Torres-2009**] Torres, F.; Puente, S.; Díaz, C., "Automatic Cooperative Disassembly Robotic System: Task Planner to Distribute Tasks among Robots". *Control Engineering Practice*, 17(1) pp. 112-121, 2009.
- [**TsaiMC-2003**] Tsai, M.-C.; Chen, K.-Y.; Cheng, M.-Y.; Lin, K. C., "Implementation of a Real-Time Moving Object Tracking System Using Visual Servoing". *Robotica*, 21(06) pp. 615-625, 2003.
- [**TsaiRY-1987**] Tsai, R. Y., "A Versatile Camera Calibration Technique for High Accuracy 3d Machine Vision Metrology Using Off-the-Shelf Tv Cameras and Lenses". *Robotics and Automation, IEEE Journal of*, 3(4) pp. 323-344, 1987.
- [**Tsuji-1999**] Tsuji, T.; Kaneko, M., "Noncontact Impedance Control for Redundant Manipulators". *Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, IEEE Transactions on*, 29(2) pp. 184-193, 1999.
- [**Valera-2009**] Valera, A.; Benimeli, F.; Solaz, J.; De Rosario, H.; Robertsson, A.; Nilsson, K.; Zotovic, R.; Mellado, M., "Development of an Experimental Test Bench by Means of Force Control in an Industrial Robot for the Analysis of the Mechanical Response in Car Seats". *Revista Iberoamericana De Automatica E Informatica Industrial*, 6(2) pp. 49-58, Apr 2009.
- [**Vargas-2000**] Vargas, M.; Malpesa, A. R.; Rubio, F. R., "Modelling and Control of a Visual Servoing System". *Systems Analysis Modelling Simulation*, 38(2) pp. 401-417, 2000.
- [**Vargas-2003**] Vargas, M.; Rubio, F. R., "Computed-Torque Scheme for 6 Dof Hybrid Feature/Position-Based Visual Servoing", En *Proceedings of the 5th IFAC International Symposium on Intelligent Components and Instruments for Control Applications*, Aveiro, Portugal, Julio 2003; pp. 157-164.
- [**Vargas-2005**] Vargas, M.; Malis, E., "Visual Servoing Based on an Analytical Homography Decomposition", En *Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision Control/European Control Conference*, Seville, Spain, Diciembre 2005; pp. 5379-5384.
- [**Versluis-2004**] Versluis, A. H. G.; Driessen, B. J. F.; van Woerden, J. A., "Enhancing the Usability of the Manus Manipulator by Using Visual Servoing". En *Advances in*

- Rehabilitation Robotics, Z. Z. Bien and D. Stefanov, Eds.; Springer-Verlag: Berlin, 2004; pp. 165-174.
- [Vikramaditya-1997]** Vikramaditya, B.; Nelson, B. J., "Visually Guided Microassembly Using Optical Microscopes and Active Vision Techniques", En Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Albuquerque, NM, USA, Abril 1997; pp. 3172-3177.
- [Villani-2008]** Villani, L.; De Schutter, J., "Force Control". En Handbook of Robotics, B. Siciliano and O. Khatib, Eds.; Springer: Berlin, 2008; pp. 161-185.
- [von Collani-1999]** von Collani, Y.; Scheering, C.; Zhang, J.; Knoll, A., "A Neuro-Fuzzy Solution for Integrated Visual and Force Control", En Proceedings of the IEEE/SICE/RSJ International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems, Taipei, Taiwan, Agosto 1999; pp. 135-140.
- [von Collani-2000]** von Collani, Y.; Ferch, M.; Zhang, J.; Knoll, A., "A General Learning Approach to Multisensor Based Control Using Statistic Indices", En Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, San Francisco, CA, USA, Abril 2000; pp. 3221-3226.
- [Walker-1982]** Walker, M. W.; Orin, D. E., "Efficient Dynamic Computer Simulation of Robotic Mechanisms". *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 104(3) pp. 205-211, 1982.
- [Wang-2008]** Wang, H. S.; Liu, Y. H.; Zhou, D. X., "Adaptive Visual Servoing Using Point and Line Features with an Uncalibrated Eye-in-Hand Camera". *Robotics, IEEE Transactions on*, 24(4) pp. 843-857, Agosto 2008.
- [Wang-2009]** Wang, Y.; Lang, H. X.; de Silva, C. W., "A Robust Mobile Robot Manipulation System Using a Switch-Based Visual-Servo Controller", En Proceedings of the International Conference on Industrial Mechatronics and Automation, Chengdu, Peoples R China, Mayo 2009; pp. 364-367.
- [Weiss-1987]** Weiss, L.; Sanderson, A.; Neuman, C., "Dynamic Sensor-Based Control of Robots with Visual Feedback". *Robotics and Automation, IEEE Journal of*, 3(5) pp. 404-417, 1987.
- [Wen-2008]** Wen, K.; Neculescu, D.; Sasiadek, J., "Haptic Force Control Based on Impedance/Admittance Control Aided by Visual Feedback". *Multimedia Tools and Applications*, 37(1) pp. 39-52, 2008.
- [Whitney-1977]** Whitney, D. E., "Force Feedback Control of Manipulator Fine Motions". *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, pp. 91-97, 1977.
- [Wilson-1996]** Wilson, W. J.; Williams Hulls, C. C.; Bell, G. S., "Relative End-Effector Control Using Cartesian Position Based Visual Servoing". *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, 12(5) pp. 684-696, 1996.
- [Willisky-1976]** Willisky, A.; Jones, H., "A Generalized Likelihood Ratio Approach to the Detection and Estimation of Jumps in Linear Systems". *Automatic Control, IEEE Transactions on*, 21(1) pp. 108-112, 1976.

- [Wirz-2004]** Wirz, R.; Marin, R., "Remote Programming of an Internet Tele-Lab for Learning Visual Servoing Techniques: A Case Study", En Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, The Hague, Netherlands, Octubre 2004; pp. 4414-4419.
- [Wu-2008]** Wu, B.; Li, H. G., "Uncalibrated Visual Servoing of Robots with New Image Jacobian Estimation Method". Xitong Fangzhen Xuebao / Journal of System Simulation, 20(14) pp. 3767-3771, 2008.
- [Wunsch-1997]** Wunsch, P.; Hirzinger, G., "Real-Time Visual Tracking of 3d Objects with Dynamic Handling of Occlusion", En Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Albuquerque, NM, USA, Abril 1997; pp. 2868-2873.
- [Xiangjin-2008]** Xiangjin, Z.; Xinhan, H.; Min, W., "Visual Servoing Based on Fuzzy Adaptive Pid with Modified Smith Predictor for Micromanipulation", En Proceedings of the IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, Xian, Peoples R China, Julio 2008; pp. 290-295.
- [Xiao-1998]** Xiao, D.; Ghosh, B. K.; Xi, N.; Tzyh Jong, T., "Intelligent Robotic Manipulation with Hybrid Position/Force Control in an Uncalibrated Workspace", En Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Leuven, Belgium, Mayo 1998; pp. 1671-1676.
- [Xiao-2000]** Xiao, D.; Ghosh, B. K.; Xi, N.; Tarn, T. J., "Sensor-Based Hybrid Position/Force Control of a Robot Manipulator in an Uncalibrated Environment". Control Systems Technology, IEEE Transactions on, 8(4) pp. 635-645, 2000.
- [Xie-2009]** Xie, W. F.; Li, Z.; Tu, X. W.; Perron, C., "Switching Control of Image-Based Visual Servoing with Laser Pointer in Robotic Manufacturing Systems". Industrial Electronics, IEEE Transactions on, 56(2) pp. 520-529, 2009.
- [Yoshihata-2009]** Yoshihata, Y.; Watanabe, K.; Iwatani, Y.; Hashimoto, K., "Visual Control of a Micro Helicopter under Dynamic Occlusions". En Recent Progress in Robotics: Viable Robotic Service to Human, S. Lee, I. H. Suh and M. S. Kim, Eds.; Springer: Berlin, 2009; pp. 185-197.
- [Zanne-2002]** Zanne, P.; Morel, G.; Plestan, F., "Sensor Based Robot Control in the Presence of Uncertainties: Bounding the Task Function Tracking Errors", En Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Washington, DC, USA, Mayo 2002; pp. 3775-3780.
- [Zeng-2009]** Zeng, X. J.; Huang, X. H.; Wang, M., "The Improved Svm Multi Objects's Identification for the Uncalibrated Visual Servoing". International Journal of Advanced Robotic Systems, 6(1) pp. 59-66, 2009.
- [Zergeroglu-2001]** Zergeroglu, E.; Dawson, D. M.; de Querioz, M. S.; Behal, A., "Vision-Based Nonlinear Tracking Controllers with Uncertain Robot-Camera Parameters". Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on, 6(3) pp. 322-337, 2001.

- [ZhangH-2002] Zhang, H.; Ostrowski, J. P., "Visual Motion Planning for Mobile Robots". *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, 18(2) pp. 199-208, 2002.
- [ZhangY-2007] Zhang, Y.; Mehrandezh, M., "Visual Servoing of a 5-Dof Mobile Manipulator Using a Panoramic Vision System", En *Proceedings of the Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, Vancouver, Canada, Abril 2007; pp. 453-456.
- [ZhangZ-1996] Zhang, Z. "Three-Dimensional Reconstruction under Varying Constraints on Camera Geometry for Robotic Navigation Scenarios". Tesis, University of Massachusetts Amherst, 1996.
- [ZhangZ-1999] Zhang, Z., "Flexible Camera Calibration by Viewing a Plane from Unknown Orientations", En *Proceedings of the International Conference on Computer Vision*, Corfu, Greece, Septiembre 1999; pp. 666-673.
- [ZhaoY-2004] Zhao, Y.; Cheah, C. C., "Hybrid Vision-Force Control for Robot with Uncertainties", En *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, New Orleans, LA, USA, Abril 2004; pp. 261-266.
- [ZhaoZJ-2009] Zhao, Z. J.; Liu, Y. C., "A Hand-Eye Calibration Algorithm Based on Screw Motions". *Robotica*, 27 pp. 217-223, 2009.
- [Zhou-1998] Zhou, Y.; Nelson, B. J.; Vikramaditya, B., "Fusing Force and Vision Feedback for Micromanipulation", En *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Leuven, Belgium, Mayo 1998; pp. 1220-1225.
- [Zhuang-1994] Zhuang, H.; Qu, Z., "A New Identification Jacobian for Robotic Hand/Eye Calibration". *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on*, 24(8) pp. 1284-1287, 1994.



Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante